



SKRIPSI – TK141581

**STUDI ABSORPSI CO₂ DALAM LARUTAN MDEA-TEA
DENGAN KATALIS PZ**

Disusun Oleh :

Donsius

NRP. 2314 106 026

Akmal Fuadi

NRP. 2314 106 045

Dosen Pembimbing 1:

Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D

NIP. 1981 07 13 2005 01 1001

Dosen Pembimbing 2:

Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D

NIP. 1984 05 08 2009 12 2004

**LABORATORIUM PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**



FINAL PROJECT – TK141581

**STUDY OF CO₂ ABSORPTION IN MDEA-TEA
SOLUTION WITH PZ CATALYST**

Complied by :

Donsius

NRP. 2314 106 026

Akmal Fuadi

NRP. 2314 106 045

Advisor 1:

Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D

NIP. 1981 07 13 2005 01 1001

Advisor 2:

Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D

NIP. 1984 05 08 2009 12 2004

**HEAT AND MASS TRANSFER LABORATORY
CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI ABSORPSI CO₂ DALAM LARUTAN MDEA-TEA DENGAN KATALIS PZ

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kimia
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

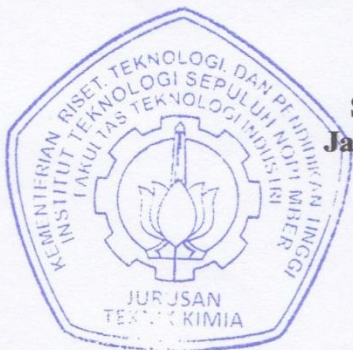
Oleh :

**Donsius
Akmal Fuadi**

**NRP : 2314 106 026
NRP : 2314 106 045**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Fadlilatul Taufany, ST, Ph.D (Pembimbing I)
2. Siti Nurkhamidah, ST, MS, Ph.D (Pembimbing II)
3. Dr. Ir. Sumarno, M.Eng (Penguji I)
4. Hikmatun Ni'mah, ST, MSc, Ph.D (Penguji II)
5. Prida Novarita T, ST, MT (Penguji III)



**Surabaya
Januari, 2017**

STUDI ABSORPSI CO₂ DALAM LARUTAN MDEA-TEA DENGAN KATALIS PZ

Mahasiswa : Donsius (2314106026)
Akmal Fuadi (2314106045)
Pembimbing I : Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D
Pembimbing II : Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D

ABSTRAK

Absorpsi karbon dioksida (CO₂) merupakan hal yang penting dalam dunia industri. Dalam industri, khususnya industri petrokimia, minyak, dan gas alam pada prosesnya diperlukan pemisahan gas CO₂ dimana gas ini merupakan gas yang korosif (*acid gas*). Maka penting dilakukan proses pemisahan CO₂ dari aliran gas, salah satu caranya adalah absorpsi reaktif menggunakan pelarut *methyldiethanolamine* (MDEA) dan *triethanolamine* (TEA) berpromotor. Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh data kinetika reaksi absorpsi CO₂ dalam larutan MDEA-TEA dengan menggunakan dengan katalis *piperazine*. *Piperazine* tergolong dalam *secondary amine* yang reaktif, sehingga dapat mempercepat laju reaksi MDEA-TEA. Selain itu, akan dilakukan perbandingan antara kereaktifan sistem larutan MDEA-TEA dengan katalis *piperazine* dan larutan MDEA berpromotor lain seperti *glycine* dan *arginine* untuk absorpsi CO₂. Metode yang digunakan adalah absorpsi menggunakan peralatan *wetted wall column* (WWC) skala laboratorium pada tekanan 1 atm. Dari penelitian ini didapatkan informasi mengenai data kinetika reaksi sebagai upaya untuk mengoptimalkan proses pemisahan CO₂ di dunia industri. Hasil yang didapat dari penelitian ini menunjukkan bahwa laju absorpsi CO₂ pada suhu 323.15 K tanpa menggunakan katalis adalah sebesar 1.67×10^{-8} kmol/det, ketika ditambahkan *piperazine* 1% berat laju absorpsinya menjadi 5×10^{-8} kmol/det, ketika ditambahkan *piperazine* 2% berat laju absorpsinya menjadi $8.3 \times$

10^{-8} kmol/det. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan *piperazine* sebagai promotor dapat menambah laju absorpsi CO_2 dan mampu menutupi kelemahan larutan MDEA-TEA. Persamaan konstanta laju reaksi absorpsi CO_2 untuk *piperazine*, yaitu $2.67 \times 10^{16} \exp (-8035.6/T)$ ($\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{det}$). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konstanta laju reaksi absorpsi CO_2 dalam pelarut MDEA-TEA dengan katalis *piperazine* lebih tinggi dibandingkan dengan katalis *glycine* dan *arginine*.

Kata kunci: absorpsi, CO_2 , wetted wall column, *piperazine*

STUDY OF CO₂ ABSORPTION IN MDEA-TEA SOLUTION WITH PZ AS CATALYST

Students : Donsius (2314106026)
Akmal Fuadi (2314106045)
Advisor I : Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D
Advisor II : Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D

ABSTRACT

The absorption of carbon dioxide (CO₂) is important in the industrial world. In industry, especially petrochemical, oil, and natural gas industry, required separation process of CO₂ gas which is a corrosive gas (acid gas). The separation process of CO₂ gas stream is important, one of the methods for removing CO₂ from the gas stream is reactive absorption using promoted composite solutions methyldiethanolamine (MDEA) and triethanolamine (TEA). Therefore, this study is aimed to obtain the reaction kinetics of CO₂ absorption data in MDEA-TEA solution using piperazine as promoter. Piperazine classified as secondary amines which is reactive, so it can accelerate the reaction rate of MDEA-TEA. Moreover, there will be a comparison between the reactivity of MDEA-TEA solution using piperazine and MDEA solution using other promoter such as glycine and arginine for CO₂ absorption. The method used is absorption using laboratory scale wetted wall column (WWC) at 1 atm. This study provides the reaction kinetics data information in order to optimize the separation process of CO₂ in the industrialized world. The experimental results show that CO₂ absorption rate at 323.15 K without catalyst is 1.67×10^{-8} kmol/s. When 1% weight of piperazine is added the absorption rate becomes 5×10^{-8} kmol/s. When 2% weight of piperazine is added the absorption rate becomes 8.3×10^{-8} kmol/s. This result show

that the addition of piperazine as a promoter can increase the absorption rate of CO₂ and cover the weaknesses of MDEA-TEA solution. Based on the experimental result, the reaction kinetic constant for piperazine is $2.67 \times 10^{16} \exp(-8035.6/T)$ (m³/kmol.s). Experimental results show that the reaction rate constant of CO₂ absorption with piperazine is higher than that glycine and arginine as catalyst.

Keywords: absorption, CO₂, wetted wall column, piperazine

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami sampaikan kepada kehadiran Tuhan YME karena dengan rahmat dan berkah-Nya kami dapat menyelesaikan Laporan Skripsi dengan judul :

“STUDI ABSORPSI CO₂ DALAM LARUTAN MDEA-TEA DENGAN KATALIS PZ”

Tugas Skripsi ini merupakan salah satu syarat kelulusan Program Studi S-1 di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan kali ini, kami menyampaikan terima kasih kepada:

1. Orangtua dan keluarga kami atas segala kasih sayang dan pengertian yang telah diberikan.
2. Bapak Juwari, S.T.,M.Eng., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Ali Altway, MSc selaku Kepala Laboratorium Proses Perpindahan Panas dan Massa yang telah banyak memberikan masukan bagi kami
4. Bapak Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D dan Ibu Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan bagi kami.
5. Dr. Ir. Sumarno, M.Eng., Hikmatun Ni'mah, ST.,MSc.,Ph.D dan Prida Novarita T, ST.,MT selaku dosen penguji Seminar Skripsi.
6. Bapak dan Ibu selaku dosen pengajar serta seluruh karyawan Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS.
7. Teman-teman Laboratorium Proses Perpindahan Panas dan Massa, rekan-rekan LJ-2014 Genap atas kebersamaannya dan semua pihak yang telah membantu secara langsung maupun tidak, sehingga kami dapat menyelesaikan tugas Skripsi ini.

Kami menyadari bahwa penyusunan Skripsi ini masih perlu penyempurnaan, oleh karena itu kami mengharap saran dan kritik yang membangun. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua, khususnya di bidang teknik kimia dan aplikasi industri kimia. Terima kasih.

Surabaya, 25 Januari 2017

Penyusun

DAFTAR ISI

Lembar Pengesahan	
Abstrak	i
KataPengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel.....	xi
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang Masalah	1
I.2 Perumusan Masalah.....	5
I.4 Tujuan Penelitian.....	5
I.5 Manfaat Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 Bahan Baku (CO ₂)	7
II.2 Metode Pemisahan CO ₂	8
II.3 Pemilihan Pelarut.....	11
II.4 Kinetika Reaksi Absorpsi CO.....	15
II.5 Absorpsi CO ₂ dalam WWC	19
II.6 Penelitian Terdahulu.....	21
BAB III METODE PENELITIAN	
III.1 Deskripsi Penelitian.....	23
III.2 Bahan dan Peralatan Penelitian	23
III.2.1 Bahan Penelitian	23
III.2.2 Peralatan Penelitian	23
III.3 Kondisi Operasi dan Variabel Penelitian.....	25
III.4 Prosedur Penelitian	26
III.4.1 Tahap persiapan bahan dan peralatan penelitian	26
III.4.2 Tahap pelaksanaan penelitian.....	26
III.4.3 Tahap analisa sampel	27
III.5 Evaluasi Data.....	27
III.6 Diagram Alir Penelitian.....	31
BAB IV METODE PENELITIAN	
IV.1Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap	

Laju Absorpsi CO ₂	33
IV.2 Kereaktifan Promotor <i>Piperazine</i> pada Absorpsi CO ₂	35
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
V.1 Kesimpulan.....	41
V.2 Saran	42
DAFTAR PUSTAKA.....	xiii
DAFTAR NOTASI	xix
APPENDIKS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1	Struktur Kimia MDEA, TEA, dan <i>Piperazine</i> ..	13
Gambar II.2	Distribusi Kecepatan <i>Wetted Wall Column</i> (WWC)	20
Gambar III.1	Kolom Absorpsi tipe WWC	24
Gambar III.2	Skema Peralatan WWC	25
Gambar III.3	Diagram Alir Penelitian	31
Gambar IV.1	Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO ₂ dalam larutan MDEA-TEA 40% berat dengan variasi % berat promotor <i>piperazine</i> pada laju alir pelarut 200 mL/menit.....	34
Gambar IV.2	Hubungan $\ln k$ dengan T pada laju absorpsi CO ₂ dalam berbagai pelarut dan promotor pada temperatur 303.15 – 333.15 K	38
Gambar IV.3	Struktur kimia (a) <i>arginine</i> , (b) <i>glycine</i> , dan (c) <i>piperazine</i>	38
Gambar IV.4	Hubungan $\ln k_{pz}$ percobaan dan literatur dengan temperatur pada laju absorpsi CO ₂ dalam larutan MDEA-TEA,MDEA pada temperatur 303.15 – 333.15 K.....	39a

(Halaman ini Sengaja Dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Spesifikasi batas konsentrasi gas CO ₂ dalam proses industri	7
Tabel II.2 <i>Solubility of CO₂ in aqueous MDEA solution</i>	13
Tabel II.3 <i>Solubility of CO₂ in aqueous TEA + PZ solution</i>	14
Tabel II.4 Penelitian terdahulu	21
Tabel IV.1 Data perhitungan konsentrasi <i>piperzine</i> dan konstanta laju reaksi <i>app</i>	36
Tabel IV.2 Perbandingan persamaan konstanta laju reaksi absorpsi CO ₂ pada berbagai macam absorbent.....	37

(Halaman ini Sengaja Dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Proses absorpsi gas ke dalam cairan sering dijumpai dalam dunia industri, seperti pada industri amoniak, *petroleum chemical plants*, dan gas alam. Tujuan dari proses absorpsi dalam industri adalah untuk memisahkan komponen dari campuran gas atau untuk menghasilkan suatu produk reaksi, dan salah satu komponen dari campuran gas yang sering dipisahkan adalah gas karbon dioksida (CO_2).

Gas CO_2 dapat merusak bagian perpipaan dan utilitas pabrik karena sifat korositasnya. Sifat korosif CO_2 akan muncul pada daerah dimana terdapat penurunan temperatur dan tekanan, seperti pada bagian *elbow* pipa, *tubing*, *cooler*, dan injektor turbin. Selain itu, gas CO_2 juga dapat mengurangi nilai kalor dari gas alam. Dimana dalam fasilitas turbin, CO_2 akan mengakibatkan penurunan nilai kalor panas akibat CO_2 dan H_2O merupakan produk dari pembakaran. Pada LNG (*Liquified Natural Gas*), gas CO_2 harus dihilangkan, karena dapat membeku pada temperatur rendah yang mengakibatkan penyumbatan pada system perpipaan dan tubing pada *heat exchanger*. Pada industri amoniak, CO_2 merupakan racun pada katalis sintesa amoniak, oleh karena itu CO_2

harus dipisahkan sebelum memasuki unit sintesa amoniak (Tan, 2012).

Selain itu, penumpukan gas CO₂ di atmosfer dapat menimbulkan efek rumah kaca yang mengakibatkan pemanasan global. Penumpukan gas CO₂ di atmosfer ini sebagian besar disebabkan oleh emisi gas CO₂ dari berbagai industri akibat proses pembakaran dan proses-proses kimia lainnya. Menurut UNEP , konsentrasi keseluruhan gas CO₂ di atmosfer selalu bertambah pada tahun 2005. Pada tahun 1860, konsentrasi gas CO₂ mendekati 280 ppmv, tahun 1958 mendekati 316 ppmv, dan tahun 2011 dengan cepat mencapai nilai 369 ppmv. Dan diprediksi konsentrasi akan terus meningkat hingga di atas 750 ppmv hingga tahun 2100 jika tidak ada upaya mengatasi kerugian yang ditimbulkan oleh gas CO₂. *Carbon Capture and Storage* (CCS) merupakan salah satu upaya untuk mengatasi emisi gas CO₂ dari industri, mulai dari pemisahan kabondioksida, transportasi dan penyimpanannya (Wang dkk, 2011).

Melihat besarnya kerugian yang dapat ditimbulkan oleh gas CO₂, maka penting dilakukan proses pemisahan gas CO₂ dari aliran gas. Rao dan Rubin (2002), mengemukakan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap CO₂, seperti : proses absorpsi secara fisik dan kimia, proses adsorpsi, proses *cryogenic* (pendinginan), teknologi membran, dan menggunakan sistem alga atau mikroba. Teknologi pemisahan CO₂ yang ekonomis, telah

dikembangkan dengan baik dan telah diaplikasikan pada berbagai proses komersial adalah proses absorpsi secara kimia.

Proses absorpsi kimia merupakan proses pemisahan gas menggunakan pelarut dengan reaktan yang dapat bereaksi dengan komponen gas yang terlarut. Penggunaan pelarut kimia dimaksudkan untuk meningkatkan pelarut dalam menyerap gas CO₂. Beberapa jenis pelarut yang sering digunakan adalah pelarut organik seperti sulfinol; kalium karbonat (K₂CO₃); dan senyawa *alkanolamine* seperti *Monoethanolamine* (MEA), *Diethanolamine* (DEA), *Diisopropanolamine* (DIPA), *Diglycolamine* (DGA), *Triethanolamine* (TEA), *Methyldiethanolamine* (MDEA), 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) dan 2-piperidineetanol (2-PE). Ada beberapa penelitian-penelitian terdahulu yang mengkaji kinetika reaksi absorpsi kedalam larutan K₂CO₃ dengan berbagai jenis promotor diantaranya yang telah dilakukan Blauwhoff dan Versteeg (1983) yang melakukan penelitian tentang studi reaksi antara CO₂ dan *alkanolamine* dalam *aqueous solution* yang mendapati bahwa DEA dan DIPA masing-masing sangat cocok sebagai absorben untuk gas CO₂. Penelitian ini juga mendapatkan persamaan laju reaksi untuk sistem ini. Yih dan Sun (1987) mempelajari absorpsi hidrogen sulfida dan CO₂ dalam larutan kalium karbonat dengan atau tanpa promotor *amine* (DEA dan DIPA) masing-masing pada temperatur 22-80°C menggunakan peralatan *Wetted Wall Column* (WWC).

Lin dan Shyu (1999) mempelajari tentang karakteristik performa dan modeling dari absorpsi CO₂ oleh *amine* dalam *packed column*. Penelitian lain juga telah dilakukan oleh Brouwer dkk (2005) mengenai *Amino-acid Salt* untuk menangkap CO₂ dari flue gas dimana larutan *amino acid salt* dapat secara baik digunakan untuk menangkap CO₂ karena memiliki resistensi yang baik terhadap oksigen dan kinetika reaksi yang cepat.

Penelitian yang dilakukan oleh Xu dkk (2003) melakukan penelitian mengenai absorpsi gas CO₂ dalam larutan MDEA dengan menambahkan Piperazine (PZ) dan DEA. Hasil penelitian ini menunjukkan *activation effect* dari masing-masing campuran baik DEA, PZ, maupun PZ+DEA dalam proses absorpsi CO₂ ini dihasilkan dari hasil variasi *rate* CO₂, transport PZ dan DEA menuju MDEA, serta *regeneration rate* dari PZ dan DEA. Aronu dan Svenden (2010) telah melakukan penelitian untuk menginvestigasi *Amine Amino Acid Salt* (AAAS) untuk absorpsi CO₂ dan mendapat kesimpulan bahwa performa AAAS hampir sama dengan MEA dalam kemampuan mengabsorpsi CO₂.

Wael, dkk (2011) telah mempelajari keuntungan dari penggunaan larutan MDEA-TEA dalam proses absorpsi gas H₂S. Hasil menunjukkan larutan MDEA-TEA dapat menurunkan 3% biaya operasi alat jika dibandingkan dengan menggunakan MDEA saja. Penurunan biaya operasi alat terjadi karena adanya penurunan kebutuhan material, *reboiler* dan *condenser duty*.

I.2 Perumusan Masalah

Penelitian – penelitian sebelumnya telah membahas tentang efek penambahan *primary amine* dan *secondary amine* sebagai katalis dalam meningkatkan laju absorpsi CO₂ ke dalam pelarut *tertiary amine* seperti yang dilakukan Xu, dkk (2013) menambahkan PZ dan DEA ke larutan MDEA. Selain itu, telah dilakukan penelitian tentang efek campuran 2 larutan *tertiary amine* dalam mengabsorpsi H₂S seperti yang dilakukan oleh Wael, dkk (2011) yaitu campuran MDEA dan TEA dapat menurunkan reboiler dan condenser duty, tetapi sampai saat ini masih belum dilakukan penelitian tentang efek penambahan katalis dalam larutan MDEA-TEA guna meningkatkan laju absorpsi CO₂ ke dalam pelarut tersebut. Sehingga pada penelitian ini dilakukan penelitian absorpsi CO₂ dalam larutan MDEA-TEA menggunakan katalis *piperazine* pada peralatan WWC skala laboratorium pada tekanan 1 atmosfer.

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Memperoleh data kinetika reaksi absorpsi CO₂ dalam larutan MDEA TEA dengan promotor *piperazine* .
2. Membandingkan kereaktifan absorpsi CO₂ untuk sistem larutan MDEA TEA berpromotor *piperazine* yang diperoleh

dari percobaan ini dengan larutan MDEA berpromotor *glycine*, *arginine* dan *piperazine* yang diperoleh dari literatur.

I.4 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini didapatkan informasi mengenai data kinetika reaksi sebagai upaya untuk mengoptimalkan proses pemisahan CO₂ di dunia industri.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Bahan Baku (CO₂)

Karbon dioksida (CO₂) adalah senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Berbentuk gas pada temperatur dan tekanan standar dan berada di atmosfer. Gas CO₂ termasuk oksida asam dan tidak berbentuk cair pada tekanan dibawah 5.1 atm tetapi berbentuk padat pada temperatur di bawah -78⁰C. Dalam bentuk padat, CO₂ disebut *dry ice*. Larutan CO₂ mengubah warna lakmus dari biru menjadi merah muda.

Gas CO₂ di produksi hampir 97% dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, seperti dari sumber batu bara, minyak, gas alam, dan biomassa. Keberadaan CO₂ pada industri gas alam dapat menurunkan nilai *heating value* pada gas dan komponen asam dapat menyebabkan korosi pada peralatan. Pada pipa gas alam, kandungan CO₂ yang diizinkan sekitar 1-2% mol (Buckingham, 1964; Ma'mun, 2005).

Adanya CO₂ yang berlebihan dapat melubangi lapisan ozon, menyebabkan efek rumah kaca, dan pemanasan global. Salah satu indikator yang digunakan dalam menganalisa isu pemanasan global adalah bertambahnya gas rumah kaca, terutama gas CO₂. Gas CO₂ yang keluar meninggalkan kolom harus memenuhi spesifikasi batas gas CO₂ (**Tabel II.1**)

Tabel II.1 Spesifikasi batas konsentrasi gas CO₂ dalam proses industri

Proses	Batas konsentrasi gas CO ₂
Industri manufaktur	< 0.1% CO ₂
Industri amoniak	< 16 ppm CO ₂
Pemurnian gas alam :	
Pipa gas	< 1% CO ₂

Bahan baku LNG	< 50 ppm CO ₂
Sintesa gas untuk produksi kimia (H ₂ CO)	< 500 ppm CO ₂
Gasifikasi batu bara	~500 ppm CO ₂
Industri etilen	~1 ppm CO ₂
Pembangkit tenaga listrik :	
Pembangkit tenaga listrik NGCC	<0.5% CO ₂
Pembangkit listrik batubara	<1.5% CO ₂

(Yildirim dkk, 2012)

Sejauh ini, berbagai upaya telah dilakukan untuk mengurangi dampak pemanasan global, seperti program penanaman kembali (reboisasi), penghematan energi, penggunaan energi baru dan terbarukan, dan pemanfaatan berbagai teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS).

CCS memungkinkan emisi CO₂ untuk dibersihkan dari aliran buangan pembakaran batu bara atau pembentukan gas dan dibuang sedemikian sehingga CO₂ tidak masuk ke atmosfer. Teknologi yang memungkinkan penangkapan CO₂ dari aliran emisi telah digunakan untuk menghasilkan CO₂ murni dalam industri makanan dan kimia. Setelah CO₂ ditangkap, penting bahwa CO₂ dapat disimpan secara aman dan permanen.

Selain memiliki beberapa efek negatif, CO₂ juga memiliki nilai ekonomis, diantaranya CO₂ digunakan dalam industri minuman berkarbonasi, *dry ice*, bahan baku pada industri urea, industri abu soda (Rao dan Rubin, 2002).

II.2 Metode Pemisahan CO₂

Rao dan Rubin (2002), mengungkapkan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap CO₂ seperti: proses *cryogenic* (pendinginan), teknologi membran, menggunakan sistem alga atau mikroba, adsorpsi, dan absorpsi.

Adsorpsi adalah proses pemisahan fluida (cairan maupun gas) yang terikat pada zat penyerap (adsorben) padatan dan akhirnya membentuk suatu *film* (lapisan tipis) pada permukaan padatan. Adsorben yang sering diaplikasikan pada proses penangkapan CO₂ adalah karbon aktif, alumina, dan zeolit. Proses adsorpsi jarang diaplikasikan pada proses gas buang CO₂, karena mempertimbangkan tantangan ketersediaan adsorben yang digunakan, selain itu selektivitas yang rendah akan berpengaruh pada pemisahan CO₂ dari aliran gas.

Membran merupakan metode pemisahan yang tidak membutuhkan zat kimia tambahan dan juga kebutuhan energinya sangat minimum. Membran dapat bertindak sebagai *filter* atau perangkat penghubung antara aliran gas dan cairan. Komponen-komponen akan terpisah berdasarkan ukuran dan bentuknya, dengan bantuan tekanan dan selaput *semi-permeable*. Hasil pemisahan berupa *retentate* (bagian dari campuran yang tidak melewati membran) dan *permeate* (bagian dari campuran yang melewati membran). Sehingga hanya molekul-molekul dengan ukuran tertentu saja yang dapat melewati membran sedangkan sisanya akan tertahan di permukaan membran. Efisiensi pemisahan teknologi membran tergantung pada tekanan parsial gas CO₂. Dengan demikian, teknologi pemisahan menggunakan membran cocok untuk konsentrasi gas CO₂ yang tinggi (di atas 20 vol%) seperti aliran gas buang dari proses *oxyfuel* dan *Integrated Gasification Combined Cycle* (IGCC).

Metode absorpsi adalah metode pemisahan yang paling ekonomis untuk memisahkan CO₂ dari aliran gas, sehingga pada penelitian kali ini yang digunakan ialah dengan metode absorpsi. Absorpsi CO₂ dengan larutan kimia atau fisika adalah teknologi yang dikembangkan dengan baik dan telah diaplikasikan pada berbagai proses komersial, termasuk pemurnian gas dan produksi amoniak (Wang dkk, 2011).

Secara umum, proses absorpsi diawali dengan penyerapan gas ke dalam liquida melalui interface. Dikenal dua macam absorpsi, yaitu :

1. Absorpsi fisik

Proses absorpsi atau perpindahan gas (difusi) kedalam absorben tanpa disertai dengan reaksi kimia.

2. Absorpsi kimia

Pada proses ini, perpindahan gas (difusi) disertai dengan reaksi antara gas dan absorben. Reaksi kimia dapat terjadi secara *reversible* dan *irreversible* dengan reaksi orde satu, orde dua dan seterusnya tergantung dari jumlah molekul yang bereaksi yang konsentrasinya berubah sebagai hasil dari reaksi kimia.

Absorpsi disertai dengan reaksi kimia telah mendapatkan perhatian yang serius dalam proses industri kimia. Proses absorpsi reaktif (*Reactive Absorption Processes/ RAP*) adalah proses yang menggabungkan mekanisme reaksi kimia dan absorpsi dalam satu unit. Secara umum, absorpsi reaktif dikenal sebagai penyerapan gas dalam medium *liquid* dengan reaksi kimia. Proses tersebut memiliki beberapa keuntungan, dimana dalam proses tersebut dapat meningkatkan *yield* reaksi dan *selectivity*, mengatasi hambatan termodinamika seperti reduksi dalam konsumsi energi, air, dan pelarut. Oleh karena adanya interaksi antara reaksi kimia dan perpindahan massa dan panas yang cukup kompleks (Gorak, 2005).

Perpindahan massa disertai reaksi kimia terjadi bila dua fasa tak berada dalam kesetimbangan kimia dikontakkan satu sama lain. Fenomena ini terdiri atas beberapa tahap elementer berikut:

- a. Difusi satu reaktan dari badan gas ke bidang batas antar fasa gas-liquida.
- b. Difusi reaktan dari *interface* ke badan fasa liquida.
- c. Reaksi kimia di dalam fasa liquida.
- d. Difusi reaktan yang semula ada di dalam badan fasa liquida dan atau produk reaksi didalam fasa liquida, akibat gradien konsentrasi yang terbentuk oleh reaksi kimia.

Proses perpindahan massa perlu disertai reaksi kimia untuk meningkatkan laju dan *yield* proses. Model-model perpindahan massa yang dijelaskan di muka dapat digunakan untuk mempelajari pengaruh reaksi kimia terhadap proses absorpsi.

Kendatipun model-model tersebut bervariasi dalam menyajikan proses yang terjadi, seluruh model ini pada umumnya memberikan hasil perhitungan matematik yang bermanfaat dan umumnya lebih disukai untuk menggunakan model yang paling sederhana untuk suatu persoalan tertentu dari pada model yang paling realistis tapi kompleks.

II.3 Pemilihan Pelarut

Pemilihan pelarut umumnya dilakukan sesuai dengan tujuan absorpsi, antara lain :

- Jika tujuan utama adalah untuk menghasilkan larutan yang spesifik, maka pelarut ditentukan berdasarkan sifat dari produk
- Jika tujuan utama adalah untuk menghilangkan kandungan tertentu dari gas, maka ada banyak pilihan pelarut. Misalnya air, dimana merupakan pelarut yang paling murah dan sangat kuat untuk senyawa polar.

Terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan jenis pelarut, yaitu kelarutan gas, volatilitas, korosivitas, harga, ketersediaan, viskositas, dan lain sebagainya. Pelarut *alkanolamine* telah digunakan sekitar 75 tahun untuk *treatment* industri gas (Booth, 2005; Wang dkk, 2011). *Alkanolamine* dapat diklasifikasikan menjadi tiga berdasarkan struktur kimianya, yaitu *primary amine*, *secondary amine* dan *tertiary amine*. *Primary amine* memiliki satu rantai alkanol dan dua atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah *Methylethanolamine* (MEA). *Secondary amine* memiliki dua rantai atom alkanol dan satu atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah *Diethanolamine* (DEA). *Tertiary amine* tidak memiliki atom hidrogen, secara langsung terikat atom nitrogen, contohnya adalah *Methyldiethanolamine* (MDEA) dan *Triethanolamine* (TEA). (Wang dkk, 2011; Yildirim dkk, 2012).

Keunggulan senyawa *alkanolamine* dalam menyerap gas CO₂ adalah laju absorpsi cepat dan biaya pelarut murah. Namun terdapat beberapa kelemahan senyawa *amine* seperti panas absorpsi tinggi, tidak dapat memisahkan senyawa-senyawa

mercaptan, konsumsi energi untuk regenerasi pelarut cukup tinggi, dan bersifat korosif.

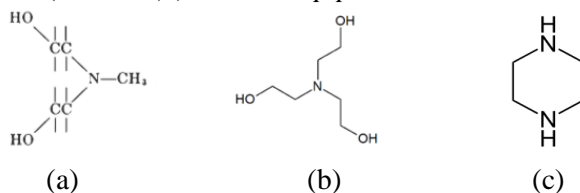
Dalam industri pengoalahan gas, larutan *aquoeous alkanolamine* telah digunakan secara luas untuk menghilangkan gas asam seperti CO_2 dan H_2S . *Triethanolamine* (TEA), *tertiary amine* menjadi *amine* pertama yang digunakan dalam beberapa aplikasi pengoalahan gas. Walaupun telah digantikan oleh MDEA dan MEA, penggunaanya masih direkomendasikan dalam penghilangan gas asam.

Penelitian ini menggunakan larutan MDEA-TEA dengan promotor *piperazine*. Larutan MDEA digunakan karena memiliki beberapa keuntungan yaitu energi yang dibutuhkan kecil, kapasitas penyerapan dan stabilitas yang tinggi. Namun larutan MDEA ini memiliki kekurangan yaitu kecepatan reaksi yang rendah.

Maka dari itu digunakan *piperazine* sebagai promotor. Penggunaan promotor ini dapat menaikkan laju reaksi tanpa menghilangkan keuntungan dari penggunaan larutan MDEA-TEA itu sendiri.

Piperazine (PZ) secara bebas larut dalam air dan etilena glikol, tetapi tidak larut dalam dietil eter dan merupakan basa lemah. Piperazine mudah menyerap air dan karbon dioksida dari udara. Meskipun banyak turunan piperazine terbentuk secara alami, piperazine sendiri dapat disintesis dengan mereaksikan amonia beralkohol dengan 1,2-dikloroetana, oleh aksi natrium dan etilena glikol pada etilen diamin hidroklorida, atau dengan pengurangan pyrazine dengan natrium dalam etanol. Piperazine pada umumnya tersedia industri adalah sebagai hexahydrate ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{N}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) yang meleleh pada 44°C dan mendidih pada $125\text{--}130^\circ\text{C}$. Telah didapatkan bahwa PZ memiliki laju reaksi yang tinggi dengan CO_2 dibandingkan monoethanolamine (MEA), 2-amino-2methyl-1-propanol (AMP), dan dimethylethanolamine (DMEA). Umumnya campuran PZ-alkanolamine meningkatkan *yield* absorption, seperti meningkatnya *loading capacity*, laju reaksi lebih cepat, dan rendahnya energy yang dibutuhkan dalam meregenerasi solvent (Lin, 2008). Keuntungan dari piperazine

yang reaktivitas yang tinggi terhadap CO₂ dan daya dukung yang tinggi untuk CO₂. Menurut studi yang dilakukan oleh Bishnoi dan Rochelle, 2002, penambahan piperazine (5 % berat) 45 % berat MDEA meningkatkan tingkat penyerapan CO₂ oleh sekitar dua kali besarnya di dibandingkan dengan 50 % berat MDEA . Karakteristik ini membuat solusi aktivasi piperazine cocok untuk aplikasi dengan konsentrasi CO₂ yang lumayan relatif tinggi terhadap H₂S. Berikut adalah struktur kimia dari MDEA p(CH₃N(C₂H₄OH)₂), TEA dan piperazine .



Gambar II.1 Struktur kimia (a) MDEA, (b) TEA, dan (c) Piperazine

Tabel II.2 *Solubility of CO₂ in aqueous MDEA solution.*

Solubility of CO₂ in aqueous (2.0 kmol · m⁻³) MDEA solution at T = 313.2 K.

Jou et al. [15]		MacGregor and Mather [16]		Austgen and Rochelle [17]		This work	
P _{CO₂} /kPa	α ^a	P _{CO₂} /kPa	α	P _{CO₂} /kPa	α	P _{CO₂} /kPa	α
0.184	0.0680	1.17	0.124	0.177	0.0440	0.28	0.0580
2.38	0.224	4.15	0.267	0.419	0.74550	0.60	0.0960
11.2	0.441	48.9	0.686	0.887	0.113	3.48	0.240
101	0.866			6.95	0.362	13.26	0.442
				92.8	0.842	18.67	0.522
						46.44	0.697
						89.90	0.803
AAD % ^b = 21.7		AAD % = 2.7		AAD % = 4.1		AAD % = 9.2	

^a α is the CO₂ loading in mol of CO₂ per mol of amine.

^b Calculated using equation (1).

(Chung et al, 2009)

Tabel II.3 *Solubility of CO₂ in Aqueous TEA + PZ Solution*
Solubility of CO₂ in aqueous (2.0 kmol · m⁻³) TEA + PZ solutions.

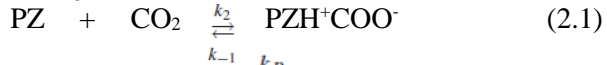
T = 313.2 K		T = 333.2 K		T = 353.2 K	
P _{CO₂} /kPa	α ^a	P _{CO₂} /kPa	α	P _{CO₂} /kPa	α
(2.0 kmol · m ⁻³) TEA					
1.62	0.085	2.60	0.077	5.42	0.066
6.56	0.128	8.58	0.114	8.05	0.080
9.56	0.169	32.91	0.207	20.56	0.108
14.98	0.205	53.88	0.243	43.01	0.134
36.27	0.345	60.17	0.257	98.14	0.178
92.98	0.534	90.97	0.340	137.9	0.191
		153.4	0.485		
TEA + (0.5 kmol · m ⁻³) PZ					
0.99	0.265	1.09	0.215	1.01	0.161
2.37	0.305	6.30	0.275	3.97	0.203
7.83	0.384	16.19	0.346	11.15	0.245
12.73	0.416	19.14	0.368	22.45	0.283
23.08	0.486	37.91	0.405	43.04	0.342
41.49	0.567	43.80	0.433	87.77	0.399
87.77	0.699	103.1	0.553		
TEA + (1.0 kmol · m ⁻³) PZ					
3.51	0.474	2.28	0.374	2.31	0.296
7.84	0.545	7.75	0.421	4.43	0.342
18.37	0.603	18.15	0.470	8.00	0.359
30.26	0.645	30.53	0.533	21.59	0.398
55.87	0.740	45.44	0.569	35.44	0.433
103.0	0.827	67.97	0.633	46.12	0.446
		117.9	0.682	91.73	0.490
TEA + (1.5 kmol · m ⁻³) PZ					
1.00	0.432	1.75	0.389	1.22	0.335
3.17	0.519	6.24	0.460	2.91	0.356
9.44	0.598	18.00	0.544	6.84	0.402
15.28	0.635	32.67	0.587	16.47	0.446
25.83	0.701	54.18	0.651	47.08	0.493
52.68	0.785	80.22	0.691	87.94	0.538
98.13	0.861	120.1	0.746		

^a α is the CO₂ loading in mol of CO₂ per mol of amine.

(Chung et al, 2009)

Kinetika alkanolamina primer dan sekunder dengan CO₂ dapat digambarkan menggunakan mekanisme zwitterion, sebagai awalnya diusulkan oleh Caplow (1968) dan kemudian diperkenalkan kembali oleh Danckwerts (1979). Hal ini mengasumsikan bahwa mekanisme ini juga berlaku untuk PZ meskipun tidak alkanolamina: piperazine akan bereaksi dengan CO₂, tingkat menjadi urutan pertama baik dalam CO₂ dan PZ,

masing-masing, di bawah pembentukan Zwitterion, yang akibatnya terdeprotonasinya oleh hadir basis B dalam cairan, juga menurut keseluruhan orde dua (pertama sehubungan dengan PZH^+COO^- dan B) laju reaksi :



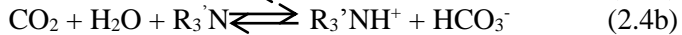
Adapun dengan mengasumsi kondisi *quasi-steady state* pada bagian zwitterion dan dengan mengasumsi reaksi transfer proton kedua *irreversible*, maka laju reaksi CO_2 dalam larutan *aqueous piperazine* dapat didefinisikan sebagai :

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{k_2[\text{PZ}][\text{CO}_2]}{1 + k_{-1}/\sum k_B B} = \frac{[\text{PZ}][\text{CO}_2]}{1/k_2 + (k_{-1}/k_2)(1/\sum k_B B)} \quad (2.3)$$

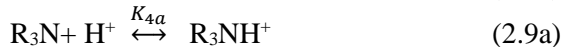
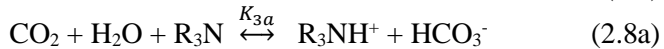
Dimana $\sum k_B B$ adalah kontribusi dari senyawa basis yang disajikan dalam larutan (PZ , PZCOO^- , PZH^+ , H_2O dan OH^-) untuk menghilangkan proton.

II.4 Kinetika Reaksi Absorpsi CO_2

- Ketika CO_2 terserap dalam larutan MDEA (R_3N) dan TEA ($\text{R}_3'\text{N}$) maka akan terjadi reaksi stoikiometri sebagai berikut (Haimour dan Sandall, 1984).



Di dalam larutan terjadi reaksi-reaksi kesetimbangan sebagai berikut.





Dimana,

$$K_w = [H^+][OH^-]; K_1 = \frac{[HCO_3^-][H^+]}{[CO_2]}; K_2 = \frac{[CO_3^{2-}][H^+]}{[HCO_3^-]};$$

$$K_{3a} = \frac{[R_3NH^+][HCO_3^-]}{[CO_2][R_3N]}; K_{3b} = \frac{[R_3'NH^+][HCO_3^-]}{[CO_2][R_3N]}; K_{4a} = \frac{[R_3NH^+]}{[R_3N][H^+]} \text{ dan}$$

$$K_{4b} = \frac{[R_3'NH^+]}{[R_3N][H^+]}$$

- Dari reaksi kesetimbangan diatas, dapat ditentukan nilai $[OH^-]$ dan $[CO_2]_e$ sebagai berikut (Yi dkk, 2009) :

$$[OH^-] = \frac{K_w}{K_2} \frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad (2.10)$$

$$[CO_2]_e = \frac{K_2 K_4}{K_3} \frac{[HCO_3^-]^2}{[CO_3^{2-}]} \quad (2.11)$$

- Nilai K_w , K_1 , K_2 , K_3 , dan K_4 didapat dari persamaan berikut :

$$K_w = \exp\left(39,555 - \frac{9,879 \times 10^4}{T} + \frac{5,6883 \times 10^7}{T^2} - \frac{1,465 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4}\right) \quad (2.12)$$

(Yi dkk, 2009; Kent dan Eisenberg, 1976)

$$K_1 = 10^{-\frac{3404,7}{T} + 6,966 \times 10^{14} - 10^{0,03279T}} \quad (2.13)$$

(Yi dkk, 2009; Danckwerts dan Sharma, 1966)

$$K_2 = \exp\left(-294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} + \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4}\right) \quad (2.14)$$

(Yi dkk, 2009; Kent dan Eisenberg 1976)

$$K_{4a} = e^{\left(32,259 - \frac{0,0424}{T}\right)} \quad (2.15)$$

(Xu dkk, 2003)

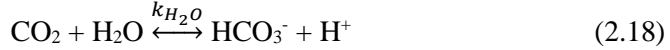
$$K_{4b} = 10^{-13,223 + 0,01792 T} \quad (2.16)$$

(Little dkk, 1990)

Tidak semua konstanta kesetimbangan *independent*, pada kasus ini konstanta kesetimbangan yang *independent* hanyalah K_w , K_1 , K_2 , dan K_4 . Adapun konstanta kesetimbangan K_3 dapat diperoleh dengan persamaan :

$$K_3 = K_1 \times K_4 \quad (2.17)$$

- Langkah – langkah reaksi yang menentukan laju reaksi untuk reaksi (2.4) adalah :

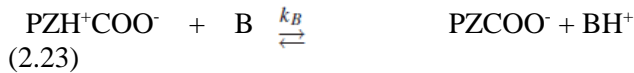
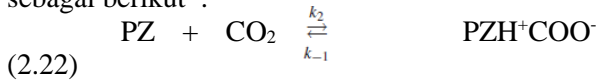


Pada larutan yang memiliki pH > 8, reaksi (2.18) dapat diabaikan, dan reaksi (2.19) yang lebih dominan dan sebagai laju reaksi pembatas (*rate limiting reaction*). Sehingga persamaan laju reaksinya adalah :

$$r_{\text{CO}_2-\text{OH}^-} = k_{\text{OH}^-} [\text{OH}^-] [\text{CO}_2] \quad (2.20)$$

$$\log_{10} k_{\text{OH}^-} = 13,635 - \frac{2895}{T \text{ (K)}} \quad (2.21)$$

Dapat diketahui dari penelitian yang telah dilakukan oleh Bishnoi and Rochelle (2000), reaksi antara CO₂ dan *piperazine* adalah sebagai berikut :



Maka, dapat diketahui persamaan laju reaksinya :

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{k_2 [\text{PZ}] [\text{CO}_2]}{1 + k_{-1} / \sum k_B B} = \frac{[\text{PZ}] [\text{CO}_2]}{1/k_2 + (k_{-1}/k_2)(1/\sum k_B B)} \quad (2.24)$$

Kumar dkk (2003) menunjukan bahwa terdapat dua kondisi asimtotik untuk amine pada larutan *aqueous* :

1. Kondisi deprotonasi dari zwitterion berlangsung sangat cepat atau $\frac{k_{-1}}{\sum k_B B} \ll 1$ persamaan kinetika turun menjadi orde dua kinetika sederhana, seperti yang ditemukan pada *primary alkanolamines* seperti MEA:

$$R_{\text{CO}_2} = k_2 [\text{CO}_2] [\text{PZ}] \quad (2.25)$$

2. Kebalikan dari kondisi nomor 1 dimana $\frac{k_{-1}}{\sum k_B B} \gg 1$.

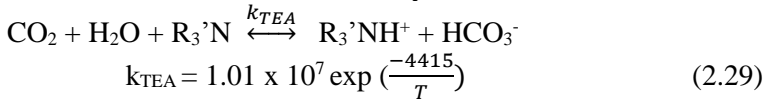
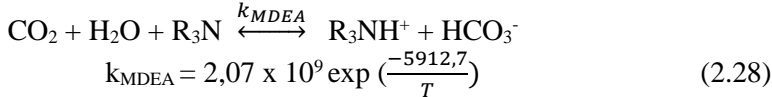
Persamaan laju reaksi menjadi :

$$R_{CO_2} = k_2 [CO_2] [PZ] (\sum k_B B / k_{-1}) \quad (2.26)$$

Adapun pada penelitian ini diberikan kondisi batas (*limiting condition*), dimana $\frac{k_{-1}}{\sum k_B B} \ll 1$ (laju deprotonisasi zwitterion lebih cepat dibandingkan dengan laju balik (*reverse rate*) dari CO_2 dan *piperazine*). Maka, berdasarkan kondisi dimana $\frac{k_{-2} arg}{\sum_i k_{Bi} [Bi]} \ll 1$ laju reaksi dapat didefinisikan sebagai persamaan berikut :

$$R_{CO_2} = k_2 [CO_2] [PZ] \quad (2.27)$$

Dapat diketahui dari penelitian sebelumnya (Pawlak dkk, 2011) bahwa nilai k_{MDEA} dan k_{TEA} (Little dkk, 1990) sebesar :



- Persamaan laju reaksi *overall* (r_{ov}) dapat
- didefinisikan sebagai berikut (Shen dkk, 2013) :

$$r_{ov} = k_{ov} [CO_2] \quad (2.30)$$

dimana k_{ov} adalah konstanta laju reaksi *overall pseudo first order*

$$k_{ov} = k_{OH^-} [OH^-] + k_{pz} [PZ] + k_{MDEA} [MDEA] + k_{TEA} [TEA] \quad (2.31)$$

Maka, dapat didefinisikan pula bahwa :

$$k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-} [OH^-] - k_{MDEA} [MDEA] - k_{TEA} [TEA] \quad (2.32)$$

$$\text{dimana, } k_{app \text{ piperazine}} = k_{pz} [PZ]^n \quad (2.33)$$

- Kondisi reaksi pada absorpsi CO_2 dalam larutan MDEA berpromotor *piperazine* umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai bilangan Hatta adalah $3 < Ha < Ei$, dimana (Lin dan Shyu, 2009) :

$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L} \quad (2.34)$$

Untuk $Ha > 3$, laju absorpsi CO_2 adalah (Danckwerts, 1970; Lin dan Shyu, 1999) :

$$\bar{R} = ([CO_2]_i - [CO_2]_e) \sqrt{D_{AL} k_{ov}} \quad (2.35)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{[R_3N]}{z [CO_2]_i} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad (2.36)$$

II.5 Absorpsi CO₂ dalam WWC

WWC merupakan kolom yang terdiri dari tabung silinder tegak dimana cairan dimasukkan dari bagian atas dan mengalir sepanjang dinding tabung berupa lapisan tipis (*film*) kemudian keluar pada bagian bawah tabung, seperti yang diilustrasikan pada **Gambar II.2**. Udara dialirkan dari bagian bawah dan keluar dari bagian atas silinder. Ketika *film* telah mencapai kecepatan akhir distribusinya kecepatan v pada ketinggian x di bawah permukaan adalah (Altway, 2008).

$$U(x) = \frac{3}{2} \left(\frac{v}{\pi d} \right)^{2/3} \left(\frac{g\rho}{3\mu} \right)^{1/3} \left(1 - x^2 \left[\frac{\pi g d \rho}{3\mu v} \right]^{2/3} \right) \quad (2.37)$$

Dimana: U = kecepatan film cairan, v = laju alir volumetrik cairan, d = diameter pipa yang dialiri cairan, g = percepatan gravitasi, ρ = densitas cairan, μ = viskositas cairan

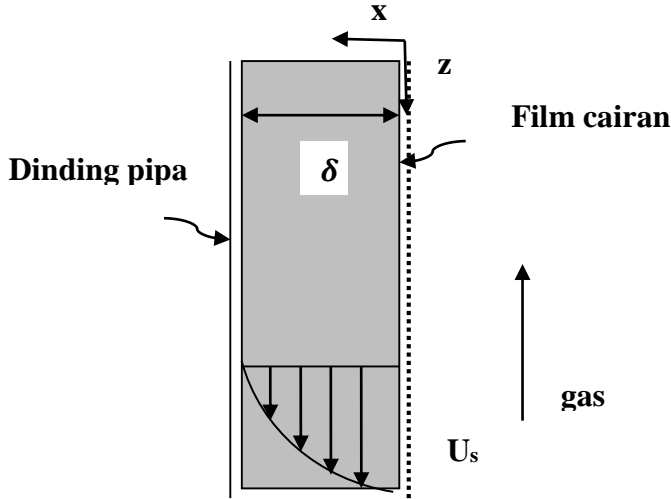
Kecepatan U adalah 0 pada permukaan dinding pipa, dimana $x = \delta$ (δ = tebal *film*), maka $\delta = \left[\frac{3\mu v}{\pi g d \rho} \right]^{1/3}$ (2.38)

Sehingga persamaan (2.35) dapat ditulis:

$$U = U_s (1 - x^2 / \delta^2) \quad (2.39)$$

Kecepatan U_s pada permukaan ($x = 0$) adalah

$$U_s = \frac{3}{2} \left(\frac{v}{\pi d} \right)^{2/3} \left(\frac{g\rho}{3\mu} \right)^{1/3} \quad (2.40)$$



Gambar II.2 Distribusi kecepatan *Wetted Wall Colum* (WWC)

Dan jika tinggi kolom adalah h dan reaksi dianggap di daerah dekat permukaan, maka waktu kontak gas terhadap permukaan *film* adalah :

$$t = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[\frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[\frac{\pi d}{v} \right]^{2/3} \quad (2.41)$$

Bila $Q_{(t)}$ adalah jumlah gas yang terserap per satuan luas permukaan selama waktu kontak (t), maka laju absorpsi rata-rata selama waktu t adalah $Q_{(t)}/(t)$. *Film* dianggap sangat tipis, maka area total permukaan yang terbuka sama dengan permukaan pipa sebesar πdh , laju total absorpsi (q) ke dalam *film* menjadi :

$$\frac{Q_{(t)}}{t} = \frac{q}{\pi dh} \quad (2.42)$$

Laju absorpsi (q) dapat dihitung secara eksperimen, dan $Q(t)$ dihitung dari persamaan (2.40), t dihitung dari persamaan (2.39) dan dapat diubah – ubah dengan merubah laju alir (v) atau tinggi kolom (h). Jadi $Q(t)$ dapat ditentukan sebagai fungsi waktu (t) (Altway, 2008).

II.6 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk referensi, seperti yang telah tercantum dalam **Tabel II.4** berikut :

Tabel II.4 Penelitian terdahulu

No	Tahun	Nama Peneliti	Uraian
1	1988	Blauwhoff	Mempelajari kinetika kimia dari reaksi karbon dioksida dengan triethanolamine.
2	2000	Bishnoi dan Rochelle	Mempelajari simulasi absorpsi CO ₂ dalam larutan piperazine/MDEA disertai reaksi kimia dengan reaksi kimia dengan menggunakan model difusivitas eddy
3	2002	Horng dan Li	Mempelajari kinetika dari absorpsi CO ₂ dalam larutan <i>aqueous monoethanolamine + triethanolamine</i>
4	2004	Culline dan Rochelle	Melakukan penambahan 0,6 M promotor <i>piperazine</i> dalam 20-30 %berat larutan kalium karbonat pada temperatur 40-80°C menggunakan peralatan WWC. <i>Piperazine</i> merupakan promotor yang efektif dikarenakan dengan penambahan 0,6 M <i>piperazine</i> dalam 20% berat larutan kalium karbonat meningkatkan laju absorpsi pada temperatur 60°C.
5	2009	Fred, dkk	Mempelajari absorpsi CO ₂ dalam larutan piperazine

6	2014	Ibrahim, dkk	Mempelajari pengaruh dari <i>piperazine</i> dalam absorpsi CO ₂ dengan larutan MDEA
7	2015	Benamor, dkk	Mempelajari kinetika reaksi CO ₂ dalam larutan N-MDEA dan glycine.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Deskripsi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan data kinetika reaksi absorpsi gas karbon dioksida (CO_2) dalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) *Triethanolamine* (TEA) berpromotor *piperazine* menggunakan peralatan *Wetted Wall Column* (WWC) skala laboratorium pada tekanan atmosfer dan temperatur 303.15 K (30°C) hingga 333.15 K (60°C).

III.2 Bahan dan Peralatan Penelitian

III.2.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah :

1. Campuran Gas CO_2 dan N_2 (dengan komposisi CO_2 20% dan N_2 80%)
2. Larutan MDEA-TEA
3. *Piperazine* 99.9 %
4. Natrium Tetraborat Dekahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
5. Asam Klorida (HCl) teknis
6. Air Demin
7. Indikator *Phenolphthalein* (PP)
8. Indikator *Metil Orange* (MO)

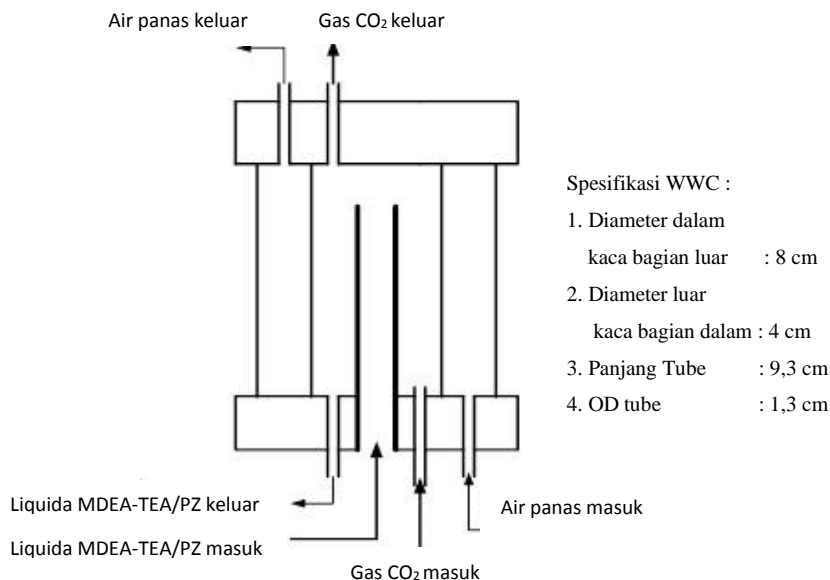
III.2.2 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian adalah :

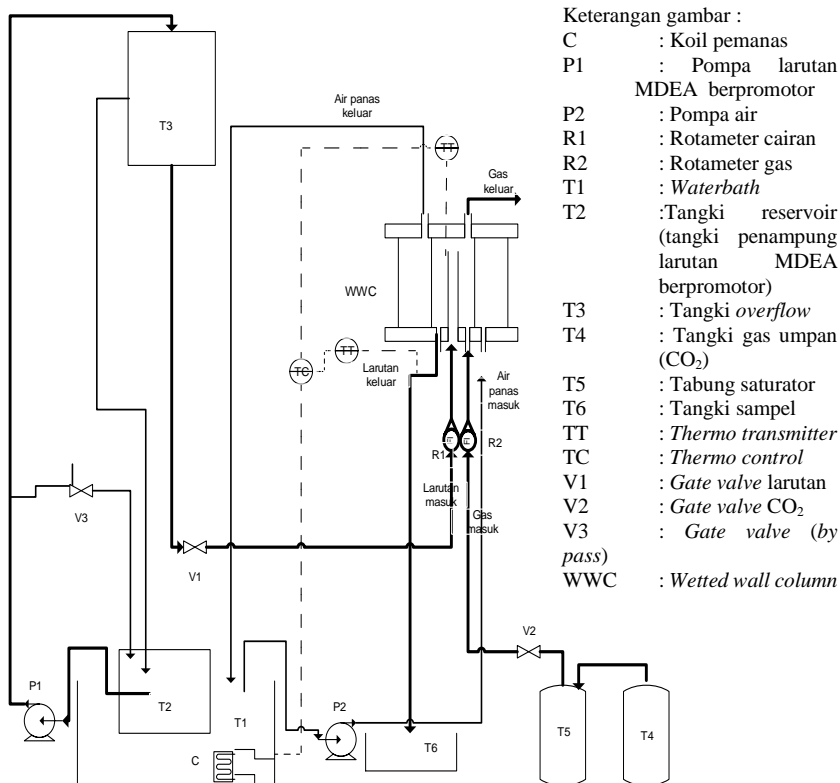
1. Peralatan *Wetted Wall Column* (Kolom Dinding Basah) :

Peralatan utama yang digunakan adalah kolom absorpsi tipe WWC, seperti ditunjukkan pada **Gambar III.1**. Desain kolom WWC ini mengacu pada beberapa peneliti sebelumnya, seperti Rochelle (2009); Pacheco dkk (2000); Bishnoi dan Rochelle (2000); Dang dan Rochelle (2001); Cullinane dan Rochelle (2004); Thee dkk (2012) yang bergerak di bidang perpindahan massa, termodinamika, dan kinetika reaksi pada proses absorpsi gas CO_2 dengan pelarut kalium karbonat dan atau dengan alkanolamine.

WWC tersusun atas dua silinder koaksial dari bahan kaca, dengan diameter dalam kaca bagian luar 8 cm dan diameter luar kaca bagian dalam 4 cm. Di bagian tengah terdapat *tube* dari bahan *stainless steel* dengan panjang 9.3 cm , diameter luar 1.3 cm dan luas permukaan kontak 37.96 cm². *Tube* berfungsi sebagai saluran aliran larutan MDEA-*arginine*. Larutan MDEA mengalir di bagian dalam tube kemudian *overflow* pada bagian ujung atas *tube* dan bergerak mengalir ke bawah membentuk lapisan tipis di seluruh permukaan *tube*, sedangkan aliran gas CO₂ mengalir dari bawah ke atas dan terjadi kontak dengan lapisan tipis larutan MDEA di seluruh permukaan luar *tube* tersebut. Sisi anulus antara kedua silinder kaca tersebut berfungsi untuk aliran pemanas dari *water bath thermostat* sebagai media pengatur kestabilan temperatur sistem WWC.



Gambar III.1 Kolom absorpsi tipe WWC



Gambar III.2 Skema peralatan WWC

III.3 Kondisi Operasi dan Variabel Penelitian

Kondisi operasi dan variabel penelitian yang digunakan pada penelitian adalah :

1. Variabel Tetap

- Kondisi operasi :

1. Tekanan : 1 atmosfer
2. Temperatur : 30, 35, 40, 45, 50, 55 dan 60 $^{\circ}\text{C}$

- Gas umpan

1. Jenis Gas umpan : campuran 20% CO_2 + 80% N_2

- 2. Laju alir gas : 6 L/menit
- Pelarut
 - 1. Jenis pelarut : MDEA (28% wt) – TEA(12% wt)
 - 2. Laju alir pelarut : 200 mL/menit
- 2. Variabel kontrol
- Promotor
 - 1. Jenis promotor : *Piperazine*
 - 2. Konsentrasi promotor: 1 dan 2% berat *piperazine*

III.4 Prosedur Penelitian

III.4.1 Tahap persiapan bahan dan peralatan penelitian

- a. Mempersiapkan bahan penelitian, seperti campuran gas CO₂ dan N₂, MDEA-TEA, *piperazine*, air demin, indikator PP, indikator MO, asam klorida, dan natrium tetraborat.
- b. Mempersiapkan peralatan penelitian, seperti bak penampung larutan MDEA-TEA, bak penampung sampel, buret, statif, erlenmeyer, labu ukur, gelas ukur, corong kaca, pipet volume, pipet tetes.
- c. Merangkai peralatan WWC seperti **Gambar III.2**.
- d. Mempersiapkan peralatan titrasi yang digunakan untuk analisa larutan.

III.4.2 Tahap pelaksanaan penelitian

- a. Mengisi air ke dalam *waterbath* (T1) sebagai pengatur temperatur dalam jaket WWC.
- b. Membuat larutan MDEA-TEA 40% berat.
- c. Menambahkan masing-masing (% berat) *piperazine* sesuai dengan variabel ke dalam larutan MDEA-TEA 40% berat.
- d. Memasukkan larutan MDEA-TEA berpromotor ke dalam tangki *reservoir* (T2).
- e. Mengatur temperatur sesuai dengan variabel.
- f. Mensirkulasikan air panas pada sisi anulus kolom WWC dan kembali ke *waterbath* (T1).

- g. Mensirkulasikan larutan MDEA-TEA berpromotor menggunakan pompa dari tangki *reservoir* (T2) ke tangki *overflow* (T3) hingga larutan *overflow*.
- h. Mengatur laju alir larutan MDEA-TEA berpromotor, sehingga larutan mengalir dari bawah ke atas melalui bagian dalam *tube* hingga terbentuk lapisan tipis pada permukaan *tube*.
- i. Pada saat temperatur sistem telah mencapai yang diinginkan dan aliran telah stabil, campuran gas CO₂ dan N₂ dialirkan melewati tangki saturator (T5).
- j. Kemudian campuran gas CO₂ dan N₂ mengalir dari bawah kolom menuju atas kolom bagian luar pipa *stainless steel* sehingga terjadi kontak antara gas CO₂ dan N₂ dengan lapisan tipis cairan di seluruh permukaan luar tube hingga kondisi *steady state*.
- k. Apabila tercapai kondisi *steady state*, mengambil sampel larutan MDEA-TEA berpromotor pada tangki penampung sampel (T6) untuk dilakukan analisa kandungan karbonat dan bikarbonat dengan metode titrasi menggunakan larutan HCl dan indikator *phenolphthalein* dan *metil orange*

III.4.3 Tahap Analisa Sampel

Analisa kandungan karbonat dan bikarbonat

Analisa konsentrasi awal dan akhir kandungan karbonat dan bikarbonat dilakukan dengan metode titrasi menggunakan larutan HCl yang telah distandardisasi dan indikator *phenolphthalein* dan *metil orange*.

III.5 Evaluasi Data

Berdasarkan data hasil eksperimen dan beberapa literatur dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan konstanta laju reaksi berpromotor dengan tahapan sebagai berikut:

- Perhitungan waktu kontak gas-cairan (Danckwerts, 1970):

$$t = \frac{h}{u_s} = \frac{2h}{3} \left[\frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[\frac{\pi d}{v} \right]^{2/3} \quad (3.1)$$

- Perhitungan jumlah gas yang diserap per satuan luas permukaan selama waktu kontak (t), maka laju rata-rata absorpsi selama t adalah $Q(t)/t$ adalah (Danckwerts, 1970):

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{q}{\pi r d h} \text{ dimana:}$$

$$q = v \times \{([CO_3^{2-}]_{out} - [CO_3^{2-}]_{in}) + ([HCO_3^-]_{out} - [HCO_3^-]_{in}) \} \quad (3.2)$$

- Perhitungan $[OH^-]$ dan $[CO_2]_e$ dari reaksi kesetimbangan menggunakan persamaan (Yi dkk, 2009) :

$$[OH^-] = \frac{K_W}{K_2} \frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad (3.3)$$

$$[CO_2]_e = \frac{K_2 K_4}{K_3} \frac{[HCO_3^-]^2}{[CO_3^{2-}]} \quad (3.4)$$

- Nilai K_w , K_1 , K_2 , K_3 , dan K_4 didapat dari persamaan berikut:

$$K_W = \exp \left(39,555 - \frac{9,879 \times 10^4}{T} + \frac{5,6883 \times 10^7}{T^2} - \frac{1,465 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4} \right) \quad (3.5)$$

(Yi dkk, 2009; Kent dan Eisenberg, 1976)

$$K_1 = 10^{-\frac{3404,7}{T} + 6,966 \times 10^{14} - 10^{0,03279T}} \quad (3.6)$$

(Yi dkk, 2009; Danckwerts dan Sharma, 1966)

$$K_2 = \exp \left(-294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} + \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4} \right) \quad (3.7)$$

(Yi dkk, 2009; Kent dan Eisenberg, 1976)

$$K_4 = e^{\left(32,259 - \frac{0,0424}{T} \right)} \quad (3.8)$$

(Xu dkk, 2003)

$$K_{4b} = 10^{-13,223 + 0,01792 T} \quad (3.9)$$

(Little dkk, 1990)

Tidak semua konstanta kesetimbangan *independent*, pada kasus ini konstanta kesetimbangan yang *independent* hanyalah K_w , K_1 , K_2 , dan K_4 . Adapun konstanta kesetimbangan K_3 dapat diperoleh dengan persamaan :

$$K_3 = K_1 \times K_4 \quad (3.10)$$

- Perhitungan nilai $[CO_2]_i$ didapatkan dengan cara trial k_{ov} , menggunakan persamaan (Altway, 2008) :

$$[CO_2]_i = \frac{k_g P_A + [CO_2]_e \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \quad (3.11)$$

Nilai koefisien perpindahan massa sisi gas (k_g) diperoleh dari persamaan (Cullinane dan Rochelle, 2004)

$$k_g = \frac{Sh D_{AG}}{R T d} \quad (3.12)$$

dimana,

$$Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AG}} \quad (3.13)$$

$$Re = \frac{\rho_g v d}{\mu_g} \quad (3.14)$$

$$Sh = 1.075 (Re Sc \frac{d}{h})^{0.85} \quad (3.15)$$

Nilai koefisien difusivitas dalam liquid diperoleh dari persamaan Wilke Chang (Wilke dan Chang, 1955) :

$$D_{AL/BL} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}} \quad (3.16)$$

sedangkan difusivitas dalam gas diperoleh dari Tabel 6.2-1 (Geankoplis 3rd edition) dan dilakukan koreksi temperatur sebagai berikut :

$$\left(\frac{D_{AG,T}}{D_{AG,T_o}} \right) = \left(\frac{T}{T_o} \right)^{1,75} \quad (3.17)$$

Data kelarutan di dapat dari persamaan konstanta Henry :

$$\log \left(\frac{He}{He^0} \right) = h_1 I_1 + h_2 I_2 \quad (3.18)$$

$$He^0 = 2,82 \times 10^6 \exp \left(\frac{-2044}{T} \right) \quad (3.19)$$

(Yi dkk, 2009; Weinsenberger dan Schumpe, 1996)

$$h_G = h_{G,o} + h_T * (T - 298,15) \quad (3.20)$$

(Weinsenberger dan Schumpe, 1996)

- Setelah didapatkan nilai $[CO_2]_i$ dari persamaan (3.11), maka nilai k_{ov} dapat ditentukan dari persamaan (Danckwerts, 1970):

$$\frac{Q}{t} = \bar{R} = ([CO_2]_i - [CO_2]_e) \sqrt{D_{AL} x k_{ov}} \quad (3.21)$$

- Menentukan nilai k_{app} dari persamaan dibawah ini :
 $k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-} [OH^-] - k_{MDEA} [MDEA] - k_{TEA} [TEA]$ (3.22)
dimana :

$$k_{app} = k_{piperazine} [piperazine]^n \quad (3.23)$$

- Harga k_{OH^-} dan k_{MDEA} diperoleh dari persamaan berikut :
 $\log_{10} k_{OH^-} = 13,635 - \frac{2895}{T}$ (3.24)
(Lin dan Shyu, 1999)

$$k_{MDEA} = 2,07 \times 10^9 \exp\left(\frac{-5912,7}{T}\right) \quad (3.25)$$

(Pawlak dkk, 2011)

$$k_{TEA} = 1.01 \times 10^7 \exp\left(\frac{-4415}{T}\right) \quad (3.26)$$

(Little dkk, 1990)

- Konstanta laju reaksi *piperazine* (k_{pz}) merupakan fungsi temperatur yang dinyatakan dengan persamaan Arhenius :

$$k_{pz} = A_{piperazine} e^{\frac{-E}{RT}} \quad (3.25)$$

$$\ln k_{pz} = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (3.26)$$

Keterangan :

- Kondisi reaksi pada absorpsi CO_2 dalam larutan MDEA berpromotor umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai $3 < Ha < \frac{1}{2} Ei$, dimana (Danckwerts, 1970; Lin dan Shyu, 1999) :

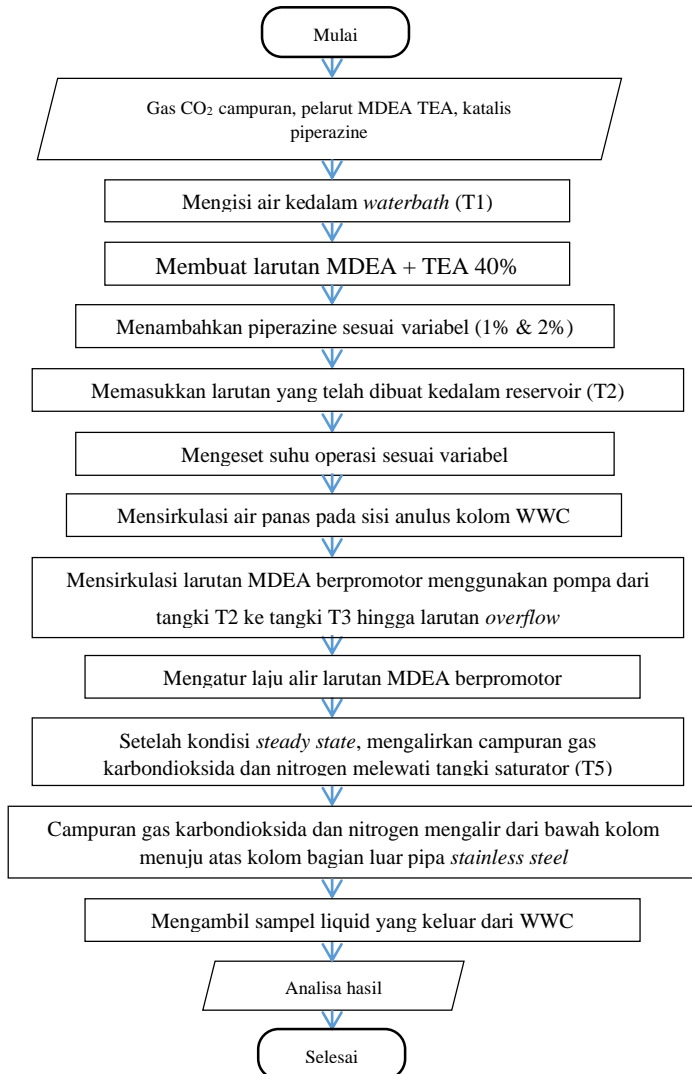
$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L} \quad (3.27)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{[R_3N]}{z [CO_2]_i} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad (3.28)$$

Nilai koefisien perpindahan massa sisi cairan (k_L) diperoleh dari persamaan (Hatta dan Katori, 1934) :

$$k_L = 0.422 \sqrt{\frac{D_{AL} x \Gamma}{\rho (B_F^2)}} \quad (3.29)$$

III. 6 Diagram Alir Penelitian



Gambar III.3 Diagram Alir Penelitian

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

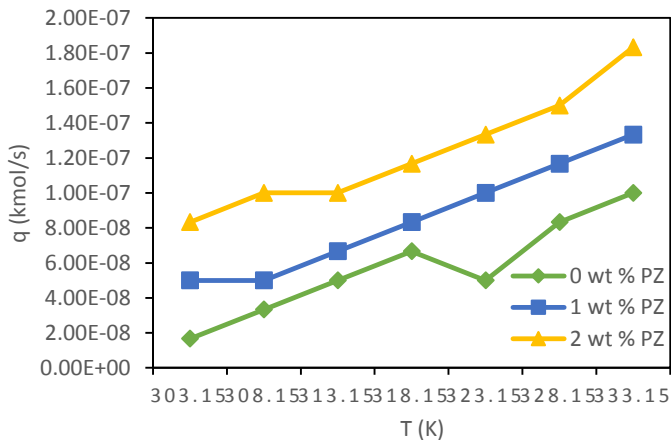
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil penelitian data kinetika laju absorpsi karbon dioksida (CO₂) dalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) dengan *Triethanolamine* (TEA) berpromotor *piperazine* menggunakan peralatan *Wetted Wall Column* (WWC) dengan temperatur 303.15 K hingga 333.15 K pada tekanan 1 atmosfer. Campuran gas yang digunakan terdiri dari 20% CO₂ dan 80% N₂. Sistem larutan terdiri dari sistem larutan 40% berat MDEA-TEA dengan variasi konsentrasi promotor *piperazine* (1% dan 2% berat). Laju alir larutan dipertahankan pada 200 mL/menit supaya aliran berada dalam kondisi laminar, sehingga lapisan film tipis yang terbentuk tetap berada dalam kondisi *steady state*.

IV.1 Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap Laju Absorpsi CO₂

Dari persamaan (3.2), dapat diketahui bahwa laju absorpsi CO₂ (q) dipengaruhi oleh konsentrasi promotor dan temperatur. Pengaruh konsentrasi promotor dan temperatur terhadap laju absorpsi CO₂ seperti yang disajikan dalam **Gambar IV.1** pada halaman selanjutnya. **Gambar IV.1** menunjukkan beberapa hal, yaitu penambahan *piperazine* pada larutan MDEA-TEA dapat meningkatkan laju absorpsi CO₂ secara signifikan, penambahan 1 dan 2% berat *piperazine* pada larutan MDEA-TEA masih dapat meningkatkan laju absorpsi CO₂, dan laju absorpsi CO₂ meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur. Pada temperatur 323.15 K, laju absorpsi CO₂ ketika hanya menggunakan larutan MDEA-TEA (tanpa *piperazine*) adalah sebesar 1.67×10^{-8} kmol/det, ketika ditambahkan 1% berat *piperazine* adalah sebesar 5×10^{-8} kmol/det dan ketika ditambahkan 2% berat *piperazine* adalah sebesar 8.3×10^{-8} kmol/det.



Gambar IV.1 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dalam larutan MDEA TEA 40% berat dengan variasi % berat promotor *piperazine* pada laju alir pelarut 200 mL/menit

Hal ini dikarenakan piperazine merupakan *secondary amine*, dimana penambahan dari *primary* atau *secondary amine* pada *tertiary amine* mampu meningkatkan laju reaksi terhadap CO_2 . Dengan penambahan sejumlah kecil *primary* atau *secondary amine* meningkatkan laju penyerapan sementara energy yang dibutuhkan untuk regenerasi kecil, (Bishnoi and Rochelle, 2000).

Hasil ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Zhang dkk (2001). Peningkatan laju absorpsi CO_2 seiring dengan meningkatnya temperatur ini terjadi karena adanya pengaruh dari energi kinetik molekul-molekul zat yang bereaksi. Energi kinetik molekul-molekul zat akan bertambah ketika temperatur dinaikkan, hal ini akan menyebabkan reaksi menjadi semakin cepat. Dikarenakan energi kinetik yang bertambah, maka gerakan molekul-molekul zat yang bereaksi menjadi semakin cepat dan nilai dari difusivitas larutan juga meningkat (Lin dan Shyu, 1999).

IV.2 Kereaktifan Promotor *Piperazine* pada Absorpsi CO₂

Dengan menghitung konstanta laju reaksi menggunakan persamaan *Arrhenius*, dapat diketahui kereaktifan *piperazine* sebagai promotor dalam absorpsi CO₂. Nilai $k_{piperazine}$ diperoleh dari k_{app} sesuai persamaan (3.23). Untuk menentukan orde reaksi digunakan metode regresi linier. Regresi linear adalah alat statistik yang dipergunakan untuk mengetahui pengaruh antara satu atau beberapa variabel terhadap satu buah variabel. Variabel yang mempengaruhi sering disebut variabel bebas, variabel independen atau variabel penjelas. Variabel yang dipengaruhi sering disebut dengan variabel terikat atau variabel dependen. Secara umum regresi linear terdiri dari dua, yaitu regresi linear sederhana yaitu dengan satu buah variabel bebas dan satu buah variabel terikat; dan regresi linear berganda dengan beberapa variabel bebas dan satu buah variabel terikat. Pada studi ini digunakan regresi linier berganda untuk mendapatkan nilai konstanta laju reaksi *piperazine* (k_{pz}). Berikut adalah persamaan umum dari regresi linier berganda (Pudjiastuti, 2016) :

$$Y = A + m X_1 + n X_2$$

Dimana,

$$\begin{aligned} k_{app} &= k_{pz} [piperazine]^n \\ k_{app} &= k_0 e^{-\frac{E}{RT}} [piperazine]^n \\ \ln k_{app} &= \ln k_0 - \frac{E}{RT} + n \ln [piperazine] \end{aligned}$$

Maka,

$$\begin{aligned} Y &= \ln k_{app} \\ A &= \ln k_0 \\ m &= -\frac{E}{R} \\ X_1 &= \frac{1}{T} \text{ dan } X_2 = \ln [piperazine] \end{aligned}$$

Berikut adalah data-data yang digunakan untuk menghitung konstanta laju reaksi *piperazine* dengan metode regresi linier berganda :

Tabel IV.1 Data perhitungan konsentrasi *piperzine* dan konstanta laju reaksi *apparent*

T(K)	1/T (K)	[Piperazine] (kmol/m ³)		ln [Piperazine]	kapp	ln kapp
303.15	0.003299	1%	0.116559859	-2.14935	5277.406	8.57119
	0.003299	2%	0.233119718	-1.4562	15976.75	9.67889
308.15	0.003245	1%	0.116559859	-2.14935	5641.046	8.637825
	0.003245	2%	0.233119718	-1.4562	25114.77	10.13121
313.15	0.003193	1%	0.116559859	-2.14935	11013.27	9.306857
	0.003193	2%	0.233119718	-1.4562	26937.8	10.20129
318.15	0.003143	1%	0.116559859	-2.14935	18945.9	9.849343
	0.003143	2%	0.233119718	-1.4562	40283.66	10.6037
323.15	0.003095	1%	0.116559859	-2.14935	30116.44	10.31283
	0.003095	2%	0.233119718	-1.4562	57996.5	10.96814
328.15	0.003047	1%	0.116559859	-2.14935	45347.31	10.72211
	0.003047	2%	0.233119718	-1.4562	81137.98	11.30391
333.15	0.003002	1%	0.116559859	-2.14935	65683.42	11.0926
	0.003002	2%	0.233119718	-1.4562	137609.2	11.83217

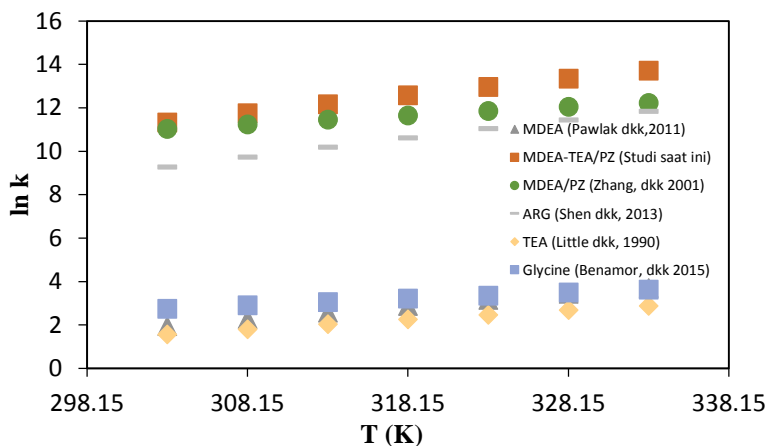
Dengan menggunakan program aplikasi *Analysis Toolpak –VBA* pada *Microsoft Excel* didapatkan bahwa nilai *n* adalah sebesar 2, nilai *m* (-E/R) adalah sebesar -8035.6, dan nilai *A* (ln *k₀*) adalah sebesar 37.82, dengan nilai anti-ln *A* (*k₀*) sebesar 2.67×10^{16} , sehingga diperoleh persamaan $k_{pz} = 2.67 \times 10^{16} e^{-\frac{8035.6}{T}}$.

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai kinetika reaksi absorpsi CO₂ kedalam berbagai macam pelarut dan promotor, berikut merupakan tabel perbandingan berbagai macam pelarut dan promotor yang biasa digunakan dalam proses absorpsi CO₂ menggunakan alat WWC yang akan dibandingkan antara MDEA-TEA/PZ dengan MDEA/PZ, penggunaan pelarut sebagai referensi dari perbedaan Arginine Shen dan Glycine Benamor .

Tabel IV.2 Perbandingan persamaan konstanta laju reaksi absorpsi CO₂ pada berbagai macam absorbent

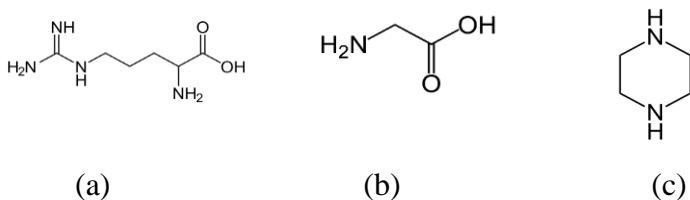
Absorbent	Nilai k (m ³ /kmol.det)	Peralatan	Referensi
Piperazine	$4 \times 10^{10} \exp\left(\frac{-4059.4}{T}\right)$	Disk Column	Zhang dkk, 2001
MDEA	$2.07 \times 10^9 \exp\left(\frac{-5912.7}{T}\right)$	Stirred Cell	Pawlak dkk, 2011
Arginine	$2.58 \times 10^{16} \exp\left(\frac{-8645}{T}\right)$	WWC	Shen dkk, 2013
Glycine	$2,94 \times 10^5 \exp\left(\frac{-2986}{T}\right)$	Stopped Flow	Benamor dkk, 2015
TEA	$1.01 \times 10^7 \exp\left(\frac{-4415}{T}\right)$	Laminar Jet	Little dkk, 1990
Piperazine	$2.67 \times 10^{16} \exp\left(\frac{-8035.6}{T}\right)$	WWC	Studi saat ini

Selanjutnya dilakukan perbandingan persamaan konstanta laju reaksi absorpsi CO₂ pada berbagai macam pelarut dan promotor. Pada temperatur 303.15 K didapat masing-masing konstanta laju reaksi absorpsi CO₂ dari berbagai pelarut dan promotor yaitu 8.23×10^4 m³/kmol.det untuk studi ini , 6.12×10^4 m³/kmol.det untuk *piperazine* (Zhang dkk, 2001) , 1.064×10^4 m³/kmol.det untuk *arginine* (Shen dkk, 2013), 15.509 m³/kmol.det untuk *glycine* (Benamor dkk, 2016), dan 7.004 m³/kmol.det untuk MDEA (Pawlak dkk, 2011). Berikut adalah plot grafik dari berbagai nilai ln k pada temperatur 303.15 K hingga 333.15 K berdasarkan **Tabel IV.2** :



Gambar IV.2 Hubungan $\ln k$ dengan T pada laju absorpsi CO_2 dalam berbagai pelarut dan promotor pada temperatur 303.15 – 333.15 K

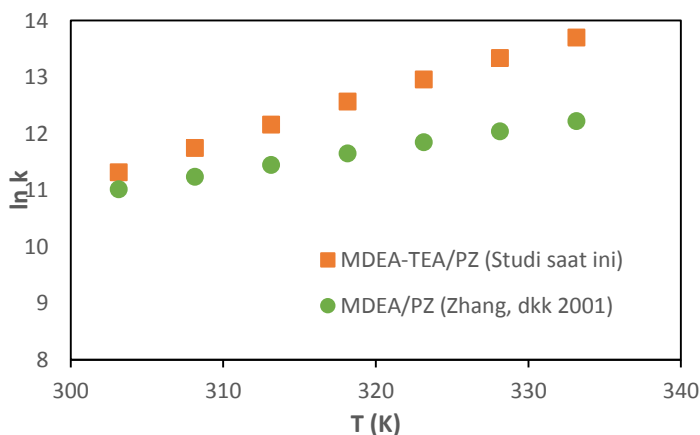
Adapun berdasarkan data-data kinetika tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai k_{pz} lebih besar dibandingkan dengan k_{glycine} dan k_{arginine}



Gambar IV.3 Struktur kimia (a) *arginine*, (b) *glycine*, dan (c) *piperazine*

Dari **Gambar IV.3** dapat diketahui bahwa *arginine* merupakan senyawa yang memiliki dua gugus NH_2 (amina primer), dua gugus NH (amina sekunder), dan gugus asam karboksilat, sedangkan *glycine* merupakan senyawa garam amina

primer yang memiliki satu gugus NH_2 dan gugus asam karboksilat, hal inilah yang menyebabkan nilai k_{glycine} lebih kecil daripada k_{arginine} . Sementara *piperazine* merupakan senyawa amina sekunder yang memiliki dua gugus NH . Diketahui bahwa *glycine* (BM 75.07) hanya memiliki satu gugus NH_2 , sedangkan *piperazine* (BM 86.14) memiliki dua gugus NH , dengan berat molekul yang tidak berbeda jauh, maka *piperazine* menjadi lebih reaktif dibandingkan dengan *glycine*. *Piperazine* memiliki rantai alisiklik, sedangkan *arginine* dan *glycine* memiliki rantai alifatik, sehingga *piperazine* jauh lebih stabil dan cepat dibanding *arginine* dan *glycine*. Oleh karena itu, nilai k_{pz} lebih besar dibandingkan dengan nilai k_{arginine} dan k_{glycine} seperti yang terlihat pada **Gambar IV.3**.



Gambar IV.4 Hubungan $\ln k_{\text{pz}}$ percobaan dan literatur dengan temperatur pada laju absorpsi CO_2 dalam larutan MDEA-TEA dan MDEA pada temperatur 303.15 – 333.15 K

Pada tahun 2001, Zhang dkk melakukan penelitian dengan promotor *piperazine* menggunakan pelarut MDEA. Berdasarkan

penelitian tersebut didapatkan nilai k_{pz} yang tercantum dalam **Tabel IV.2**.

Gambar IV.4 menunjukkan bahwa nilai k_{pz} mengalami kenaikan seiring dengan pertambahan temperatur, baik pada penelitian ini maupun pada penelitian Zhang dkk (2001). Namun terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua nilai k_{pz} tersebut, dalam hal ini nilai k_{pz} yang didapat berdasarkan hasil percobaan ini lebih besar jika dibandingkan dengan nilai k_{pz} pada penelitian Zhang dkk (2001). Hal ini terjadi karena dengan adanya penambahan TEA pada MDEA/PZ. TEA dan MDEA merupakan *tertiary amine* dimana dapat diaktifasi dengan baik oleh *piperazine* yang merupakan *secondary amine*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian kinetika reaksi absorpsi karbon dioksida (CO_2) kedalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) dan *Triethanolamine* (TEA) berpromotor *piperazine* menggunakan peralatan *Wetted Wall Column* (WWC) dengan konsentrasi MDEA-TEA sebesar 40% berat pada temperatur 303.15 K hingga 333.15 K, dapat disimpulkan bahwa :

1. Penambahan promotor *piperazine* kedalam larutan MDEA dapat meningkatkan laju absorpsi CO_2 secara signifikan. Pada temperatur 303.15 K, laju absorpsi CO_2 ketika hanya menggunakan larutan MDEA-TEA (tanpa *piperazine*) adalah sebesar 1.67×10^{-8} kmol/det, ketika ditambahkan 1% berat *piperazine* adalah sebesar 5×10^{-8} kmol/det, dan ketika ditambahkan 2% berat *piperazine* adalah sebesar 8.3×10^{-8} kmol/det.
2. Persamaan konstanta laju reaksi absorpsi CO_2 untuk *piperazine*, yaitu $k_{pz} = 2.67 \times 10^{16} \exp (-8035.6/T)$ ($\text{m}^3/\text{kmol}.\text{det}$).
3. Konstanta laju reaksi absorpsi CO_2 dalam pelarut berpromotor *piperazine* lebih tinggi dibandingkan dengan pelarut MDEA berpromotor *glycine* dan *arginine*. Hal ini dikarenakan kereaktifan sistem larutan MDEA berpromotor *piperazine* lebih tinggi jika dibandingkan dengan kereaktifan sistem larutan MDEA berpromotor *glycine* dan *arginine*.

V.2 Saran

Dari hasil penelitian maka saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut :

1. Perlu adanya penelitian lebih lanjut terhadap proses absorpsi kimia CO₂ dalam larutan MDEA-TEA/PZ dengan menambahkan variable seperti konsentrasi dan temperatur.
2. Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan pengkajian ulang metode analisa yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Altway, Ali. (2008). Perpindahan massa disertai reaksi kimia. Jakarta: Bee Marketer Institut.
- Aronu, E.U and Svenden, F.S. (2010). Investigation of amine amino acid salt for carbon dioxide absorbtion. International Journal of Greenhouse Gas Control, 4, 771-775.
- Bishnoi, P.S. (2000). Carbon dioxide absorption and solution equilibrium in piperazine activated methyldiethanolamine (Ph.D Dissertation). Austin: The University of Texas.
- Bishnoi, P.S and Rochelle, G.T. (2000). Absorption of carbon dioxide into aqueous piperazine: Reaction kinetics, mass transfer and solubility. Chem. Eng. Sci., 55(22), 5531-5543.
- Blauwhoff, P.M.M., and Versteeg, G.F. (1983). A study on the reaction between CO₂ and alkanolamines in aqueous solutions. Chemical Engineering Science, 38(9), 1411-1429.
- Booth, N.J. (2005). Secondment to the international test centre for CO₂ capture (ITC). Canada: University of Regina
- Brouwer, J.P., and Feron, P.H.M., Asbroek Ten, N.A.M. (2005). Amino-acid salt for CO₂ capture from flue gas. TNO Science & Industry: Department of Separation Technology.
- Buckingham, P., (1964). Fluor solvent process plants: how they are working. Hydrocarbon Process, 43, 113.
- Cullinane, J.T., and Rochelle, G.T. (2004). Carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by piperazine. Chemical Engineering Science, 59, 3619-3630.
- Dang, Hongyi, and Rochelle, G.T. (2001). CO₂ absorption rate and solubility in monoethanolamine/piperazine/water (Dissertation). Austin: The University of Texas

- Danckwerts, P.V. (1970). Gas-liquid reactions. New York: McGraw-Hill.
- Danckwerts, P.V., Sharma, M.M. (1966). Absorption of carbon dioxide into solutions of alkalis and amines. The Chemical Engineering CE, 244-280.
- Damara, Brian, dan Permatasari, Novita Diah. (2014). Studi kinetika penyerapan CO₂ menggunakan larutan kalium karbonat berpromotor senyawa amine (Skripsi). Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Elhosane, Y., Altway, A., Susianto, (2016). Kinetics study of carbon dioxide absorption into methyldiethanolamine (Theses). Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Geankoplis, Christie J. (1997). Transport processes and unit operations 3rd edition. New Delhi: Prentice-Hall of India
- Gorak, Andrzej. (2005). European roadmap for process intensification: reactive absorption. Ohio: Velocys Inc
- Gosh, U.K., and Kentish, S.E. (2009). Absorption of carbon dioxide into aqueous potassium carbonate promoted by boric acid. Energy Procedia, 1, 1075-1081.
- Haimour, N., and Sandall, O.C. (1984). Absorption of carbon dioxide into aqueous methyldiethanolamine. Chemical Engineering Science, 39 (12), 1791-1796.
- Hatta, S., and Katori, M.J. (1934). Suppl binding. Soc. Chem. Ind., 280-282.
- Hestia, Maria, dan Arsi, Kartika. (2015). Studi kinetika absorpsi karbon dioksida menggunakan larutan diethanolamine berpromotor glycine (Skripsi). Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Holst, J.V., Versteeg G.F., Brilman D.W., Brilman, J.A., Hogendoorn. (2009). Kinetic study of CO₂ with various amino acid salts in aqueous solution. Chemical Engineering Science, 64, 59–68.
- Jing, G., Zhou, L., Zhou, Z. (2012). Characterization and kinetics of carbon dioxide absorption into aqueous

- tetramethylammonium glycinate solution. *Chem. Eng. J.* 181–182, 85–92.
- Kent, R. L., and Eisenberg, B. (1976). Better data for amine treating. *Hydrocarbon Process*, 55, 87-90.
- Kim, H. M., Song, M., Lee, H., Park Jo, J. (2012). Kinetics and steric hindrance effects of carbon dioxide absorption into aqueous potassium alaninate solutions. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51, 2570–2577.
- Knuutila, Hanna, and Juliussen, Olav. (2010). Density and N₂O solubility of sodium and potassium carbonate solutions in the temperature range 25 to 80°C. *Chemical Engineering Science*, 2177-2182.
- Kumar, P.S., Hogendoorn, J.A., Versteeg, G.F. (2003). Kinetics of the reaction of CO₂ with aqueous potassium salt of taurine and glycine. *AIChE J.*, 49, 203–213.
- Lin, S.H and Shyu, C.T. (1999). Performance characteristics and modeling of carbon dioxide absorption by amines in a packed column. *Waste Management*, 19, 255-262.
- Ma'mun, S. (2005). Selection and characterization of new absorbents for carbon dioxide capture (Doctoral Thesis). Norway: Norwegian University of Science and Technology.
- Paul, S., and Thomsen, K. (2012). Kinetics of absorption of carbon dioxide into aqueous potassium salt of proline. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 8, 169–179.
- Pawlak, Hanna K., Siemeniec, M., Chacuk, Andrzej. (2011). Reaction kinetics of CO₂ in aqueous methyldiethanolamine solutions using the stopped-flow technique. *Chemical and Process Engineering*, 33(1), 7-18.
- Pacheco, M.A., Kaganoi, S., Rochelle, G.T. (2000). CO₂ absorption into aqueous mixtures of diglycolamine and methyldiethanolamine. *Chemical Engineering Science*, 55, 5125-5140

- Rifah, Amalia. (2014). Kinetics study of carbon dioxide absorption into aqueous potassium carbonate solution promoted by blended amine (Skripsi). Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Rao, A.B., and Rubin, E.S. (2002). A technical, economic, and environmental assessment of amine-based CO₂ capture technology for power plant greenhouse gas control (Technical Progress Report). West Virginia: National Energy Technology Laboratory.
- Rochelle, G.T. (2009). Amine scrubbing for CO₂ capture. *Science*, 325, 1652–1654.
- Shen, S., Feng, X., Zhao, R. (2013). Kinetic study of carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by arginine. *Chemical Engineering Journal*, 222, 478-48.
- Tan, Chung-Sung. (2012). A review of CO₂ capture by absorption and adsorption. Taiwan: National Tsing Hua University.
- Thee, H., Smith, K.H., Silva, da G., Kentish, S.E. (2012). Carbon dioxide absorption into unpromoted and borate-catalyzed potassium carbonate solutions. *Chemical Engineering Journal*, 181-182, 604-701.
- Vaidya, P.D., Konduru, P., Vaidyanathan, M., Kenig, E.Y. (2010). Kinetics of carbon dioxide removal by aqueous alkaline amino acid salts. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 11067–11072.
- Wang, M., Lawal, A., Stephenson, P., (2011). Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: a state-of-the-art review. *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 1609-1624.
- Weisenberger, S., and Schumpe, A. (1996). Estimation of gas solubilities in salt solutions at temperatures from 273 K to 363 K. *AIChE J.*, 42(1), 298–300.
- Wilke, C. R., and Chang, Pin. (1955). Correlation of diffusion coefficient in dilute solutions. *AIChE J.*, 1.

- Xu, Z., Yanhua Y., Chengfang Z. (2003). Absorption rate of CO₂ into MDEA aqueous solution blended with piperazine and diethanolamine. Chinese Journal Chemical Engineering, 11(4), 408-413.
- Yi Fei, Z., Hai-Kui, C., Guang-Wen, Shao. Lei. (2009). Modeling and experimental studies on absorption of CO₂ by benfield solution in rotating packed bed. Chemical Engineering Journal, 145, 377-384.
- Yih. S.M., and Sun. C.C. (1987). Simultaneous absorption of hydrogen sulphide and carbon dioxide into potassium carbonate solution with or without amine promoters. The Chemical Engineering Journal, 34, 65-72.
- Yildirim, O., Kiss A.A., Huser, N., Lessman, K., Kenig, E.Y. (2012). Reactive absorption in chemical process industry: a review on current activities. Chemical Engineering Journal, 1(213), 371-391.
- Zhang, X., Zhang C.F., Liu, Y. (2002). A kinetics absorption of carbon dioxide into aqueous solution of MDEA blended with DEA. Ind. Eng. Chem. Res., 41(5), 1135-1141.

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

DAFTAR NOTASI

A'	<i>Pre-exponensial factor</i>
B_F	Tebal film (m)
d	Diameter pipa yang dialiri liquid (m)
D_{AG}	Koefisien difusi gas CO ₂ (m ² det ⁻¹)
D_{AL}	Diffusivitas CO ₂ dalam H ₂ O, (m ² det ⁻¹)
D_{BL}	Diffusivitas MDEA dalam H ₂ O, (m ² det ⁻¹)
E	Energi aktivasi (kg m ⁻² det ²)
E_i	<i>Enhancement factor</i>
g	Percepatan gravitasi (m s ⁻²)
h	Tinggi kolom (m)
h	Kekuatan ionik total larutan (m ³ /kmol)
h_+, h_-, h_G	Kontribusi ion positif, negatif dan gas terhadap faktor kelarutan (m ³ kmol ⁻¹)
Ha	Bilangan Hatta
He	Konstanta Henry (Pa m ³ kmol ⁻¹)
He^0	Konstanta Henry untuk sistem gas-cair (Pa m ³ kmol ⁻¹)
I	Kekuatan ionik larutan (ion m ³)
k_{app}	Konstanta reaksi orde satu semu (det ⁻¹)
k_{ov}	Konstanta laju reaksi <i>overall pseudo first order</i> (det ⁻¹)
k_{MDEA}	Konstanta laju reaksi antara MDEA dengan CO ₂ (m ³ kmol ⁻¹ det ⁻¹)
k_{OH-}	Konstanta laju reaksi dari reaksi (2.19) (m ³ kmol ⁻¹ det ⁻¹)
k_{H_2O}	Konstanta laju reaksi dari reaksi (2.18) (det ⁻¹)
k_{pz}	Konstanta laju reaksi untuk <i>piperazine</i> (m ³ kmol ⁻¹ det ⁻¹)
$k_{app\ pz}$	Konstanta reaksi orde satu semu antara <i>piperazine</i> dan CO ₂ (det ⁻¹)
k_g	Koefisien perpindahan massa sisi gas (kmol m ⁻² det ⁻¹ Pa ⁻¹)

k_L	Koefisien perpindahan massa sisi cairan, ($\text{kmol m}^{-2} \text{det}^{-1}$)
K_1	Konstanta kesetimbangan ionisasi pertama dari reaksi (2.14) (kmol m^{-3})
K_2	Konstanta kesetimbangan ionisasi kedua dari reaksi (2.15) (kmol m^{-3})
K_3	Konstanta kesetimbangan ionisasi ketiga dari reaksi (2.17)
K_4	Konstanta kesetimbangan ionisasi keempat dari reaksi (2.16) ($\text{m}^3 \text{kmol}^{-1}$)
K_w	Konstanta kesetimbangan ionisasi air (2.13) ($\text{kmol}^2 \text{m}^{-6}$)
M_B	Berat molekul pelarut (kg mol^{-1})
n	Orde reaksi
P_A	Tekanan parsial CO_2 (Pa)
P_{Ai}	Tekanan parsial CO_2 pada <i>interface</i> (Pa)
q	Laju absorpsi total (kmol det^{-1})
Q	Jumlah gas yang terabsorpsi (kmol m^{-2})
r_{ov}	Laju reaksi overall ($\text{kmol m}^{-3} \text{det}^{-1}$)
$r_{\text{CO}_2\text{-KArg}}$	Laju reaksi CO_2 dalam <i>arginine</i> ($\text{kmol m}^{-3} \text{det}^{-1}$)
R	Konstanta gas ($\text{m}^3 \text{Pa kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
\bar{R}	Laju absorpsi per satuan luas setelah waktu kontak t ($\text{kmol m}^{-2} \text{det}^{-1}$)
R	Laju reaksi gas ($\text{kmol m}^{-3} \text{det}^{-1}$)
Re	<i>Reynold number</i>
Sc	<i>Schmidt number</i>
Sh	<i>Sherwood number</i>
t_c	Waktu kontak gas terhadap permukaan (det)
T	Temperatur (K)
U	Distribusi kecepatan film liquid (m det^{-1})
U_s	Kecepatan di permukaan film (m det^{-1})
V_A	Volume molar ($\text{m}^3 \text{kmol}^{-1}$)
v	Laju alir liquida ($\text{m}^3 \text{det}^{-1}$)
x	Jarak dari permukaan film cairan (m)
Z_i	Valensi ion

Z Koefisien mol reaktan yang bereaksi dengan 1 mol gas terlarut

Huruf Latin

δ Tebal *film* cairan (m)
 ρ Densitas liquida (kg m^{-3})
 μ Viskositas liquida ($\text{kg m}^{-1} \text{det}^{-1}$)
 ϕ Parameter asosiasi pelarut
 Γ *Mass velocity liquid* (kg/m.s)

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

APPENDIKS A

A.1 Menentukan Keadaan *Steady State*

Keadaan *steady state* merupakan kondisi dimana tidak ada perubahan pH dan tidak dipengaruhi oleh waktu. Berdasarkan penelitian didapatkan hubungan pH tiap waktunya seperti yang didapatkan sebagai berikut :

Tabel A.1 Data pengukuran pH larutan setiap waktu

Waktu (menit)	pH
0	10,3
1	10,1
2	10,1
3	9,94
4	9.94
5	9.94

Berdasarkan **Tabel A.1**, dapat diketahui bahwa kondisi *steady state* dicapai pada waktu $t = 3$ menit. Sehingga pengambilan sampel pada penelitian ini dilakukan pada saat $t = 3$ menit.

A.2 Analisa Data

Berikut adalah contoh perhitungan hasil eksperimen pada variabel konsentrasi promotor *piperazine* (1% berat), laju alir pelarut 200 mL/menit, dan temperatur 30°C (303.15 K).

Analisa Awal Larutan :

Untuk menganalisa adanya kandungan karbonat dan bikarbonat mula-mula dalam larutan, dilakukan titrasi menggunakan asam klorida (HCl) dengan indikator PP dan MO. Titrasi pertama bertujuan untuk mengetahui kandungan karbonat mula – mula sebagai berikut :

Volume sampel larutan : 10 mL
Normalitas HCl : 0.5 N
Volume HCl ($V_{\text{HCl}}\text{PP}$) : 28.1 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol karbonat mula – mula dalam 10 mL sampel larutan yaitu :

$$\begin{aligned}
 [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{mula-mula}} &= \frac{N_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl (PP)}} \times \text{faktor pengenceran}}{V_{\text{sampel}}} \\
 &= \frac{0.5 \text{ N} \times 28.1 \text{ mL} \times 1}{10 \text{ mL}} \\
 &= 1.405 \text{ mmol/mL} \approx 1.405 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}
 \end{aligned}$$

Titrasi kedua bertujuan untuk mengetahui kandungan bikarbonat mula-mula sebagai berikut :

Volume sampel larutan : 10 mL
 Normalitas HCl : 0.5 N
 Volume HCl ($V_{\text{HCl}}_{\text{MO}}$) : 39.1 mL
 Volume HCl ($V_{\text{HCl}}_{\text{MO-PP}}$) : 11 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol bikarbonat mula – mula dalam 10 mL sampel larutan yaitu :

$$\begin{aligned}
 [\text{HCO}_3^-]_{\text{mula-mula}} &= \frac{N_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl (MO-PP)}} \times \text{faktor pengenceran}}{V_{\text{sampel}}} \\
 &= \frac{0.5 \text{ N} \times 11 \text{ mL} \times 1}{10 \text{ mL}} \\
 &= 0.55 \text{ mmol/mL} \approx 0.55 \text{ kmol/m}^3
 \end{aligned}$$

Analisa Akhir Larutan :

Untuk menganalisa adanya kandungan karbonat dan bikarbonat akhir dalam larutan, dilakukan titrasi menggunakan asam klorida (HCl) dengan indikator PP dan MO. Titrasi pertama bertujuan untuk mengetahui kandungan karbonat akhir sebagai berikut :

Volume sampel larutan : 10 mL
 Normalitas HCl : 0.5 N
 Volume HCl ($V_{\text{HCl}}_{\text{PP}}$) : 28.3 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol karbonat akhir dalam 10 mL sampel larutan yaitu:

$$\begin{aligned}
 \text{Mol CO}_3^{2-} \text{ akhir} &= \frac{N_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl (PP)}} \times \text{faktor pengenceran}}{V_{\text{sampel}}} \\
 &= \frac{0.5 \text{ N} \times 28.3 \text{ mL} \times 1}{10 \text{ mL}} \\
 &= 1.415 \text{ mmol/mL} \approx 1.415 \text{ kmol/m}^3
 \end{aligned}$$

Titration kedua bertujuan untuk mengetahui kandungan bikarbonat akhir sebagai berikut:

Volume sampel larutan : 10 mL

Normalitas HCl : 0.5 N

Volume HCl (V_{HCl})_{MO} : 39.4 mL

Volume HCl (V_{HCl})_{MO-PP}: 1.2 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol bikarbonat mula-mula dalam 10 mL sampel larutan yaitu :

$$\begin{aligned} \text{Mol } HCO_3^- \text{ akhir} &= \frac{N_{HCl} \times V_{HCl(MO-PP)} \times \text{faktor pengenceran}}{V_{\text{sampel}}} \\ &= \frac{0.5 \text{ N} \times 11.1 \text{ mL} \times 1}{10 \text{ mL}} \\ &= 0.555 \text{ mmol/mL} \approx 0.555 \text{ kmol/m}^3 \end{aligned}$$

Menentukan Waktu Kontak

$$t_c = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[\frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[\frac{\pi d}{v} \right]^{2/3}$$

dimana,

$$h = 0.093 \text{ m}$$

$$\mu_{\text{larutan}} = 0.001375 \text{ kg/m.s (30 } ^\circ\text{C)}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\rho_{\text{larutan}} = 1004 \text{ kg/m}^3 \text{ (30 } ^\circ\text{C)}$$

$$d = 0.013 \text{ m}$$

$$v = 200 \text{ ml/menit} \approx 3.333 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}$$

$$\pi = 3.14$$

Sehingga waktu kontak antara gas dengan larutan adalah :

$$\begin{aligned} t_c &= \frac{2(0.093 \text{ m})}{3} \left[\frac{3(0.001375 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}})}{(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(1004 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})} \right]^{1/3} \left[\frac{(3.14)(0.013 \text{ m})}{(3.333 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det})} \right]^{2/3} \\ &= 0.246 \text{ detik} \end{aligned}$$

Menentukan Laju Absorpsi Gas CO_2 (q)

$$\text{Laju alir pelarut (v)} = 200 \text{ ml/menit} = 3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}$$

$$[CO_3^{2-}]_{\text{mula-mula}} = 1.405 \text{ kmol/m}^3$$

$$[CO_3^{2-}]_{\text{akhir}} = 1.415 \text{ kmol/m}^3$$

$$[HCO_3^{2-}]_{\text{mula-mula}} = 0.55 \text{ kmol/m}^3$$

$$[HCO_3^{2-}]_{\text{akhir}} = 0.555 \text{ kmol/m}^3$$

Sehingga laju absorpsi gas CO₂ adalah :

$$\begin{aligned} q &= v \times [(CO_3^{2-})_{\text{akhir}} - (CO_3^{2-})_{\text{mula-mula}}] + ([HCO_3^{2-}]_{\text{akhir}} - [HCO_3^{2-}]_{\text{mula-mula}}) \\ &= (3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}) \times \{(1.415 \text{ kmol/m}^3) - (1.405 \text{ kmol/m}^3)\} + \{(0.555 \text{ kmol/m}^3) - (0.55 \text{ kmol/m}^3)\} \\ &= 4.995 \times 10^{-8} \text{ kmol/det} \end{aligned}$$

Menentukan Laju Rata-Rata Absorpsi Selama t Waktu

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{q}{\pi dh}$$

dimana,

$$q = 1.33 \times 10^{-7} \text{ kmol/det}$$

$$d = 0.013 \text{ m}$$

$$h = 0.093 \text{ m}$$

Maka, laju rata-rata absorpsi yang didapat selama t waktu (Q(t)/t) adalah :

$$\begin{aligned} \frac{Q(t)}{t} &= \frac{4.995 \times 10^{-8} \text{ kmol/det}}{(3.14)(0.013 \text{ m})(0.093 \text{ m})} \\ &= 1.316 \times 10^{-5} \text{ kmol/m}^2.\text{det} \end{aligned}$$

Menentukan Konsentrasi Gas CO₂ Terlarut ([CO₂]_e) dan [OH⁻]

$$K_W = \exp \left(39,555 - \frac{9,879 \times 10^4}{T} + \frac{5,6883 \times 10^7}{T^2} - \frac{1,465 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4} \right)$$

$$K_1 = 10^{-\frac{3404,7}{T} + 6,966 \times 10^{14} - 10^{0,03279T}}$$

$$K_2 = \exp \left(-294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} + \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4} \right)$$

$$K_{4a} = e^{(32,259 - \frac{0,0424}{T})}$$

$$K_{3a} = K_1 \times K_{4a}$$

$$K_{4b} = 10^{(-32,259 + 0.01792T)}$$

$$K_{3b} = K_1 \times K_{4b}$$

Didapatkan nilai $K_w = 1.264 \times 10^{-14} \text{ kmol}^2/\text{m}^6$, $K_1 = 4.695 \times 10^{-7} \text{ kmol}/\text{m}^3$, $K_2 = 5.156 \times 10^{-11} \text{ kmol}/\text{m}^3$, $K_{4a} = 5.97 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{kmol}$, $K_{4b} = 1.11 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kmol}$, $K_{3a} = 280.068$, dan $K_{3b} = 5.22 \times 10^{-15}$. Sehingga konsentrasi CO_2 terlarut pada temperatur 303.15 K adalah :

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_w}{K_2} \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = \frac{1.264 \times 10^{-14}}{5.156 \times 10^{-11}} \frac{\left(\frac{1.405+1.415}{2}\right)}{\left(\frac{0.55+0.555}{2}\right)} = 0.000626 \text{ kmol}/\text{m}^3$$

$$\begin{aligned} [\text{CO}_2]_e &= \frac{K_2 K_{4a}}{K_{3a}} \frac{[\text{HCO}_3^-]^2}{[\text{CO}_3^{2-}]} \\ &= \frac{5.156 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^8}{280.068} \frac{\left(\frac{0.55+0.555}{2}\right)^2}{\left(\frac{1.405+1.415}{2}\right)} \\ &= 2.377 \times 10^{-5} \text{ kmol}/\text{m}^3 \\ [\text{CO}_2]_{e'} &= \frac{K_2 K_{4b}}{K_{3b}} \frac{[\text{HCO}_3^-]^2}{[\text{CO}_3^{2-}]} \\ &= \frac{5.156 \times 10^{-11} \times 1.11 \times 10^{-8}}{5.22 \times 10^{-15}} \frac{\left(\frac{0.55+0.555}{2}\right)^2}{\left(\frac{1.405+1.415}{2}\right)} \\ &= 2.377 \times 10^{-5} \text{ kmol}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

Menentukan Konstanta Henry

Harga konstanta Henry didapat dari persamaan berikut :

$$\log\left(\frac{He}{He^0}\right) = h_1 I_1 + h_2 I_2$$

dimana, He^0 adalah konstanta henry untuk sistem gas-cair dan I adalah kekuatan ionic dari larutan yang diperoleh dari :

$$He^0 = H_{e298} \exp\left[\frac{-d \ln kH}{d\left(\frac{1}{T}\right)} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right]$$

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2$$

Ci adalah konsentrasi ion – ion yang valensinya Zi.

$$h = h_+ + h_- + h_G$$

$$h_G = h_{G,0} + h_T(T-298.15)$$

Namun pada pelarut MDEA ini tidak terionisasi sehingga I=0

$$\log\left(\frac{He}{He^0}\right) = 0$$

$$H_e = H_e^0$$

Sehingga, konstanta Henry dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} H_e^0 &= 3.6 \times 10^{-5} \exp(2200 \cdot (1/303.15 - 1/298)) \\ &= 3.176 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3 \cdot \text{atm} \\ &= 3.176 \times 10^{-7} \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{Pa} \\ &= 3148947.125 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa/kmol} \end{aligned}$$

Menentukan Diffusivitas CO_2 dan CO_3^{2-}

- Diffusivitas CO_2 dan CO_3^{2-} dalam air dapat dihitung menggunakan persamaan Wilke Chang (Wilke dan Chang, 1955) sebagai berikut :

$$D_{AL (CO_2-H_2O)} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}}$$

dimana,

φ = Association parameter dari pelarut (water = 2.6)

M_B = Berat molekul pelarut (kg/kmol)

T = Temperatur (K)

μ_B = Viskositas pelarut (kg/m.s)

V_A = Solute molar volume (m^3/kmol)

$$\begin{aligned} D_{AL (CO_2-H_2O)} &= 1.173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}} \\ &= 1.173 \times 10^{-16} \sqrt{(2.6) \left(18 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right)} \times \frac{303.15 \text{ K}}{\left(0.002198 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}\right) (0.034 \text{ m}^3/\text{kmol})^{0.6}} \\ &= 8.417 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{det} \end{aligned}$$

*Dengan cara yang sama, didapatkan $D_{BL}(\text{CO}_3^{2-}-\text{H}_2\text{O})$ sebesar $8.417 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{det}$.

- Diffusivitas CO_2 dalam gas N_2 didapat dari Tabel 6.2-1 (Geankoplis, 1993) pada temperatur 298 K sebesar $1.67 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{det}$, sehingga perlu dilakukan koreksi temperatur sebagai berikut:

$$\left(\frac{D_{AG,T}}{D_{AG,T_0}} \right) = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,75}$$

Sehingga, diffusivitas CO_2 dalam gas N_2 (D_{AG}) pada temperatur 30°C (303.15 K) adalah:

$$\begin{aligned} \left(\frac{D_{AG, 303.15 \text{ K}}}{1.67 \times 10^{-5}} \right) &= \left(\frac{303.15 \text{ K}}{298.15 \text{ K}} \right)^{1,75} \\ (D_{AG, 303.15 \text{ K}}) &= \left(\frac{303.15 \text{ K}}{298.15 \text{ K}} \right)^{1,75} \times 1.67 \times 10^{-5} \\ (D_{AG, 303.15 \text{ K}}) &= 1.719 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{det} \end{aligned}$$

Menentukan Koefisien Perpindahan Massa sisi Gas (k_G)

$$k_g = \frac{Sh D_{AG}}{R T d}$$

dimana,

$$\begin{aligned} Sc &= \text{Schmidt number} = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AG}} \\ &= \frac{1.832 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}}{1.256 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.719 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{det}} = 0.848 \end{aligned}$$

$$v = \frac{4 Q_G}{\pi \times d^2} = \frac{4 \times (0.0001 \frac{\text{m}^3}{\text{s}})}{\pi \times (0.013 \text{ m})^2} = 0.753778 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

dimana Q_G (laju alir gas) = 6 L/min = 0.0001 m^3/s

Re = Reynold number

$$\begin{aligned} &= \frac{\rho_g v d}{\mu_g} \\ &= \frac{1.256 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.753778 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.013 \text{ m}}{1.832 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}} \end{aligned}$$

$$= 671.82$$

Sh = Sherwood number

$$\begin{aligned}
&= 1.075 \left(Re \, Sc \, \frac{d}{h} \right)^{0.85} \\
&= 1.075 \left(671.82 \times 0.848 \times \frac{0.013 \, m}{0.093 \, m} \right)^{0.85} \\
&= 44.413
\end{aligned}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned}
k_g &= \frac{44.413 \times 1.719 \times 10^{-5} \, m^2/det}{8314 \frac{m^3 Pa}{kmol K} \times 303.15 \, K \times 0.013 \, m} \\
&= 2.33051 \times 10^{-8} \, kmol/s.m^2.Pa
\end{aligned}$$

Menentukan Koefisien Perpindahan Massa Sisi Cairan (k_L)

$$k_L = 0.422 \sqrt{\frac{D_{AL} \times \Gamma}{\rho_L (B_F^2)}}$$

dimana,

Γ = Liquid-flow rate, (kg/m.s) based on wetted perimeter

ρ_L = Liquid density, (kg/m³)

h = Panjang area kontak, (m)

μ = Viskositas liquid, (kg/m.s)

g = Gravity acceleration, (9.80665 m/s²)

k_L = Koefisien perpindahan massa sisi cairan, (kmol/s.m²)

$$\begin{aligned}
\Gamma &= \frac{Q_L \times \rho_L}{h} = \frac{3.333 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} \times 1039 \, kg/m^3}{0.093 \, m} \\
&= 0.0372 \frac{kg}{m.s}
\end{aligned}$$

$$B_F = \left\{ \frac{3 \mu_L \Gamma}{\rho_L^2 g} \right\}^{1/3}$$

$$\begin{aligned}
B_F &= \left\{ \frac{3 \times \left(0.002198 \frac{kg}{m.s} \right) \times \left(0.0372 \frac{kg}{m.s} \right)}{\left(1039 \frac{kg}{m^3} \right)^2 \times \left(9.80665 \frac{m}{s^2} \right)} \right\}^{1/3} \\
&= 0.00029 \, m
\end{aligned}$$

Sehingga,

$$k_L = 0.422 \sqrt{\frac{D_{AL} \times \Gamma}{\rho_L (B_F^2)}}$$

$$k_L = 0.422 \sqrt{\frac{8.417 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 0.0372 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}}{1039 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (0.00029 \text{ m})^2}}$$

$$= 0.000257 \text{ kmol/s.m}^2$$

Menentukan Konsentrasi CO₂ dalam Interface ([CO₂]_i) dan Konstanta Laju Reaksi Overall Pseudo First Order (k_{ov})

$$[CO_2]_i = \frac{k_g P_A + [CO_2]_e \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \dots\dots\dots (a)$$

$$\frac{Q}{t} = \bar{R} = ([CO_2]_i - [CO_2]_e) \sqrt{D_{AL} k_{ov}} \dots\dots\dots (b)$$

dimana,

k_g = Koefisien perpindahan massa sisi gas, (kmol/s.m².Pa)

P_A = Tekanan parsial gas CO₂, (Pa)

D_{AL} = Koefisien difusi gas CO₂, (m²/det)

H_e = Konstanta Henry, (Pa.m³/kmol)

[CO₂]_e = Konsentrasi gas CO₂ berkesetimbangan dalam cairan, (kmol/m³)

$$\text{Misal : } \varphi = \sqrt{D_{AL} \times k_{ov}}$$

Substitusikan pers (a) → (b)

$$\begin{aligned} \frac{Q}{t} &= \left(\frac{k_g P_A + [CO_2]_e \varphi}{k_g H_e + \varphi} - [CO_2]_e \right) \varphi \\ &= \left(\frac{k_g P_A + [CO_2]_e \varphi - [CO_2]_e k_g H_e - [CO_2]_e \varphi}{k_g H_e + \varphi} \right) \varphi \\ &= \left(\frac{k_g P_A - [CO_2]_e k_g H_e}{k_g H_e + \varphi} \right) \varphi \end{aligned}$$

$$\frac{Q}{t} k_g H_e + \frac{Q}{t} \varphi = k_g P_A \varphi - [CO_2]_e k_g H_e \varphi$$

$$\varphi = \frac{\frac{Q}{t} k_g H_e}{k_g P_A - [CO_2]_e k_g H_e - \frac{Q}{t}} = 0.00211 \text{ m/det}$$

Sehingga,

$$\varphi = \sqrt{D_{AL} \times k_{ov}}$$

$$\varphi^2 = D_{AL} \times k_{ov}$$

$$k_{ov} = \varphi^2 / D_{AL}$$

$$\begin{aligned}
&= (0.00211 \text{ m/det})^2 / 8.417 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{det} \\
&= 5306.116 \text{ det}^{-1} \\
[CO_2]_i &= \frac{k_g P_A + [CO_2]_e \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \\
&= \\
&\frac{(2.33 \times 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \text{m}^2 \text{Pa}) (0.2 \times 101325 \text{ Pa}) + (2.377 \times 10^{-5}) \sqrt{(8.417 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{det}}) (\frac{5306.116}{\text{det}})}}{(2.33 \times 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \text{m}^2 \text{Pa}) (3148947 \frac{\text{m}^2 \text{Pa}}{\text{kmol}}) + \sqrt{(8.417 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{det}}) (\frac{5306.116}{\text{det}})}} \\
&= 0.00626 \text{ kmol/m}^3
\end{aligned}$$

Menentukan Apparent Reaction Rate Constant (k_{app})

$$\begin{aligned}
\log_{10} k_{OH^-} &= 13.635 - \frac{2895}{T} \\
&= 13.635 - \frac{2895}{303.15 \text{ K}} \\
k_{OH^-} &= 12169.483 \text{ m}^3/\text{kmol} \cdot \text{det} \\
k_{MDEA} &= 2.07 \times 10^9 \exp\left(\frac{-5912.7}{T}\right) \\
&= 2.07 \times 10^9 \exp\left(\frac{-5912.7}{303.15}\right) \\
&= 7.005 \text{ m}^3/\text{kmol} \cdot \text{det} \\
k_{TEA} &= 1.01 \times 10^7 \exp\left(\frac{-4415}{T}\right) \\
&= 1.01 \times 10^7 \exp\left(\frac{-4415}{303.15}\right) \\
&= 4.779 \text{ m}^3/\text{kmol} \cdot \text{det}
\end{aligned}$$

Konsentrasi 1% berat *piperazine* dalam 20000 gram (17.7 liter) larutan campuran MDEA dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
\text{BM } piperazine &= 86.136 \text{ g/mol} \\
\text{Massa } piperazine &= 1\% \times 20000 \text{ gram} = 200 \text{ gram} \\
\text{Molaritas } piperazine &= (20 \text{ gram} / 86.136 \text{ g/mol}) / 17.7
\end{aligned}$$

L

$$\begin{aligned}
&= 0.0131 \text{ mol/L} \approx 0.0131 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \\
k_{app} &= k_{ov} - k_{OH^-} [OH^-] - k_{MDEA} [MDEA] - k_{TEA} [TEA] \\
&= (5306.166) - \{(12169.483) \times (0.00022)\} - \\
&\quad \{(7.005) \times (2.44)\} - \{(4.779) \times (0.836)\} \\
&= 5282.392 \text{ det}^{-1}
\end{aligned}$$

Pembuktian Regim Reaksi Cepat Pseudo First Order

Kondisi reaksi pada absorpsi CO₂ kedalam larutan MDEA berpromotor umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai yaitu $3 < Ha < \frac{1}{2} Ei$ (Danckwerts, 1970; Lin dan Shyu, 1999) :

$$H_a = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L}$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z [CO_2]_i} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad \text{dimana,}$$

k_{ov} = Konstanta laju reaksi overall pseudo first order, (det⁻¹)

D_{AL} = Diffusivitas CO₂ dalam H₂O, (m²/det)

D_{BL} = Diffusivitas CO₃²⁻ dalam H₂O, (m²/det)

k_L = Koefisien perpindahan massa sisi cairan, (kmol/s.m²)

C_{B0} = Konsentrasi awal reaktan, (kmol/ m³)

Z = Koefisien mol reaktan yang bereaksi dengan 1 mol gas terlarut

$[CO_2]_i$ = Konsentrasi gas CO₂ dalam *interface*, (kmol/m³)

$$H_a = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L}$$

$$= \frac{\sqrt{(5306.166 \text{ det}^{-1})(8.417 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{det}})}}{(0.000257 \frac{\text{kmol}}{\text{s.m}^2})}$$

$$= 8.223$$

$$\frac{1}{2} Ei = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z [CO_2]_i} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \right\}$$

$$= \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{(8.417 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{det}})}{(8.417 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{det}})}} + \frac{(0.836 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3})}{(1)(0.00626 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3})} \sqrt{\frac{(8.417 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{det}})}{(8.417 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{det}})}} \right\}$$

$$= 67.293$$

Karena hasil yang didapat sudah memenuhi ketentuan yang ada $3 < H_a < \frac{1}{2} E_i$, maka TERBUKTI bahwa reaksi ini berada pada regim cepat *pseudo first order*.

Menentukan Persamaan Konstanta Laju Reaksi untuk Piperazine

$$k_{app} = k_{piperazine} [piperazine]^n$$

$$k_{app} = k_0 e^{-\frac{E}{RT}} [piperazine]^n$$

$$\ln k_{app} = \ln k_0 - \frac{E}{RT} + n \ln [piperazine]$$

$$Y = A + m X_1 + n X_2$$

dimana : $Y = \ln k_{app}$

$$A = \ln k_0$$

$$m = -\frac{E}{R}$$

$$n = \text{orde reaksi}$$

$$X_1 = \frac{1}{T}$$

$$X_2 = \ln [piperazine]$$

Tabel A.2 Data perhitungan konsentrasi *piperazine* dan konstanta laju reaksi *apparent*

T (K)	1/T (K)	[Piperazine] (kmol/m ³)		ln [Piperazine]	k _{app}	ln k _{app}
303.1 5	0.0032 99	1%	0.1165	-2.15	5277.406	8.57
		2%	0.2331	-1.46	15976.75	9.68
308.1 5	0.0032 45	1%	0.1165	-2.15	5641.046	8.64
		2%	0.2331	-1.46	25114.77	10.13
313.1 5	0.0031 93	1%	0.1165	-2.15	11013.27	9.31
		2%	0.2331	-1.46	26937.8	10.20
318.1 5	0.0031 43	1%	0.1165	-2.15	18945.9	9.85
		2%	0.2331	-1.46	40283.66	10.60

323.1	0.0030	1%	0.1165	-2.15	30116.44	10.31
5	95	2%	0.2331	-1.46	57996.5	10.97
328.1	0.0030	1%	0.1165	-2.15	45347.31	10.72
5	47	2%	0.2331	-1.46	81137.98	11.30
333.1	0.0030	1%	0.1165	-2.15	65683.42	11.09
5	02	2%	0.2331	-1.46	137609.2	11.83

Nilai Y , X_1 , dan X_2 didapatkan dari data pada **Tabel A.2**, kemudian dengan menggunakan program aplikasi *Analisis Toolpak –VBA* pada *Microsoft Excel* didapatkan:

- $A = \ln k_0$
 $\ln k_0 = 37.82$
 $k_0 = 2.67 \times 10^{16}$
- $m = -\frac{E}{R} = -8035.61$
- $n = 2$

Sehingga, didapatkan persamaan $k_{\text{piperazine}}$ sebagai berikut :

$$K_{\text{piperazine}} (\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{det}) = 2.67 \times 10^{16} e^{-\frac{8035.61}{T}}$$

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

APPENDIKS B

B.1 Hasil Analisa Menggunakan Metode Titration

Tabel B.1 Data perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ dengan promotor *piperazine* pada konsentrasi 1% berat

T (K)	Molaritas HCl (M)	Vol HCl (pp)	Vol HCl (mo)	$[\text{HCO}_3^-]$ awal (kmol/m ³)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ awal (kmol/m ³)	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir (kmol/m ³)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir (kmol/m ³)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ rata-rata (kmol/m ³)
303.15	0.5	28.3	39.4	0.55	1.405	0.555	1.415	1.41
308.15	0.5	28.3	39.4	0.55	1.405	0.555	1.415	1.41
313.15	0.5	28.3	39.5	0.55	1.405	0.56	1.415	1.41
318.15	0.5	28.4	39.6	0.55	1.405	0.56	1.42	1.4125
323.15	0.5	28.4	39.7	0.55	1.405	0.565	1.42	1.4125
328.15	0.5	28.4	39.8	0.55	1.405	0.57	1.42	1.4125
333.15	0.5	28.5	39.9	0.55	1.405	0.57	1.425	1.415

Tabel B.2 Data perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ dengan promotor *piperazine* pada konsentrasi 2% berat

T (K)	Molaritas HCl (M)	Vol HCl (pp)	Vol HCl (mo)	[HCO ₃ ⁻] awal (kmol/m ³)	[CO ₃ ²⁻] awal (kmol/m ³)	[HCO ₃ ⁻] akhir (kmol/m ³)	[CO ₃ ²⁻] akhir (kmol/m ³)	[CO ₃ ²⁻] rata-rata (kmol/m ³)
303.15	0.5	28.3	39.6	0.55	1.405	0.565	1.415	1.41
308.15	0.5	28.4	39.7	0.55	1.405	0.565	1.42	1.4125
313.15	0.5	28.5	39.7	0.55	1.405	0.56	1.425	1.415
318.15	0.5	28.5	39.8	0.55	1.405	0.565	1.425	1.415
323.15	0.5	28.6	39.9	0.55	1.405	0.565	1.43	1.4175
328.15	0.5	28.6	40	0.55	1.405	0.57	1.43	1.4175
333.15	0.5	28.7	40.2	0.55	1.405	0.575	1.435	1.42

B.3 Nilai Konstanta Henry

Tabel B.3 Data perhitungan konstanta Henry pada berbagai variabel temperatur

T(K)	(-d ln Kh / d(1/T))	((1/T)-(1/298))	EXP ((-d ln Kh / d(1/T)) x ((1/T)-(1/298)))	He ₂₉₈	He°t (kmol/m ³ .Pa)	He°t (m ³ .Pa/kmol)
303.15	2200	-5.70E-05	0.882129063	3,6E-05	3,17566E-07	3148947,125
308.15		-0.000110	0.784138071		2,8229E-07	3542460,036
313.15		-0.000162	0.699658346		2,51877E-07	3970191,731

318.15	-0.000212	0.626520914	2,25548E-07	4433655,314
323.15	-0.000261	0.562948895	2,02662E-07	4934333,829
328.15	-0.000308	0.507479364	1,82693E-07	5473676,32
333.15	-0.000354	0.45890212	1.65205E-07	6053094.237

B.4 Hasil Perhitungan Diffusivitas

Tabel B.4 Hasil perhitungan diffusivitas

T (K)	D_{AL}(CO₂->H₂O) (m²/det)	D_{AG}(CO₃²⁻→N₂) (m²/det)	D_{AL}(CO₃²⁻→H₂O) (m²/det)
303.15	8.41712E-10	1.71932E-05	8.41712E-10
308.15	9.96607E-10	1.76925E-05	9.96607E-10
313.15	1.16745E-09	1.81979E-05	1.16745E-09
318.15	1.35399E-09	1.87095E-05	1.35399E-09
323.15	1.55654E-09	1.92271E-05	1.55654E-09
328.15	1.7754E-09	1.97507E-05	1.7754E-09
333.15	2.00906E-09	2.02803E-05	2.00906E-09

B.5 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

Tabel B.5 Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa sisi gas pada temperatur 303.15 – 333.15 K

T (K)	Sc	Re	Sh	kg (kmol/s.m ² .Pa)
303.15	0.848358725	671.817266	44.41256902	2.33051E-08
308.15	0.850560333	651.167201	43.34487987	2.30256E-08
313.15	0.849575538	633.815297	42.31943061	2.27539E-08
318.15	0.852860099	614.112269	41.33391503	2.24896E-08
323.15	0.852116924	598.101611	40.38618648	2.22325E-08
328.15	0.855491738	579.947805	39.47424451	2.19822E-08
333.15	0.854168855	565.6763619	565.6763619	2.17384E-08

Tabel B.6 Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa sisi liquid pada temperatur 303.15 - 333.15 K dengan konsentrasi MDEA 40% berat dengan promotor *piperazine* (1% & 2% berat)

Temperatur (K)	k _L (kmol/s.m ²)	
	<i>Piperazine</i> (1% berat)	<i>piperazine</i> (2% berat)

303.15	0.000257013	0.000247918
308.15	0.00029397	0.000283943
313.15	0.000333391	0.000322535
318.15	0.000374878	0.00036342
323.15	0.00041847	0.000406348
328.15	0.000464121	0.000451306
333.15	0.000511405	0.000497676

B.7 Laju Absorpsi, Waktu Kontak Absorpsi CO₂, dan C_{Ae}

Tabel B.7 Hasil perhitungan laju absorpsi dan C_{Ae} pada waktu kontak sebesar 0.2465 detik pada temperatur 303.15 - 333.15 K dengan konsentrasi MDEA 40% berat dengan promotor *piperazine* (0%, 1%, & 2% berat)

Temperatur (K)	Laju Absorpsi, q (kmol/det)			C _{Ae} (mmol/mL)		
	<i>Piperazine</i> (0% berat)	<i>Piperazine</i> (1% berat)	<i>Piperazine</i> (2% berat)	<i>Piperazine</i> (0% berat)	<i>Piperazine</i> (1% berat)	<i>Piperazine</i> (2% berat)
303.15	1.66667E-08	5.00E-08	8.33333E-08	2.37E-05	2.38E-05	2.42E-05
308.15	3.33333E-08	5.00E-08	0.0000001	2.52E-05	2.50E-05	2.54E-05
313.15	5E-08	6.67E-08	0.0000001	2.63E-05	2.64E-05	2.63E-05
318.15	6.66667E-08	8.33E-08	1.16667E-07	2.73E-05	2.75E-05	2.77E-05

323.15	5E-08	1.00E-07	1.33333E-07	2.82E-05	2.89E-05	2.88E-05
328.15	8.33333E-08	1.17E-07	0.00000015	2.97E-05	3.05E-05	3.04E-05
333.15	0.0000001	1.33E-07	1.83333E-07	3.11E-05	3.19E-05	3.21E-05

B.8 Hasil Perhitungan Konsentrasi CO₂ dalam Interface (C_{Ai}) dan Konstanta Laju Reaksi Overall Pseudo First Order (k_{ov})

Tabel B.8 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 - 333.15 K dengan konsentrasi MDEA 40% berat dengan promotor *piperazine* (1% berat)

T (K)	P (Pa)	C _{ai}	φ	k _{ov}
303.15	20265.000	0.006256012	0.002113343	5306.115623
308.15		0.005559129	0.00237995	5683.447983
313.15		0.004909893	0.003596033	11076.68897
318.15		0.004350571	0.005077725	19042.41188
323.15		0.003866818	0.006863576	30264.93542
328.15		0.003446853	0.008995548	45578.32095
333.15		0.003080956	0.011519215	66046.96567

Tabel B.9 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 - 333.15 K dengan konsentrasi MDEA 40% berat dengan promotor *piperazine* (2% berat)

T (K)	P (Pa)	C_{Ai}	ϕ	k_{ov}
303.15	20265.000	0.006136364	0.003591438	16007.27435
308.15		0.005397657	0.004903332	25160.07378
313.15		0.004812695	0.005503482	27005.89836
318.15		0.004262511	0.007256971	40386.85213
323.15		0.003786778	0.0093461	58155.10404
328.15		0.003373878	0.011817765	81383.34478
333.15		0.002980862	0.016377493	137991.7557

B.10 Hasil Perhitungan k_{app}

Tabel B.10 Data perhitungan konsentrasi *piperazine* dan konstanta laju reaksi *apparent* dengan konsentrasi MDEA 40% berat dengan promotor *arginine* (1% & 2% berat)

T (K)	[Arginine] (kmol/m³)	k_{app}
303.15	1%	0.1166
	2%	0.2331
308.15	1%	0.1166
	2%	0.2331
313.15	1%	0.1166
	2%	0.2331
318.15	1%	0.1166
	2%	0.2331
323.15	1%	0.1166
	2%	0.2331
328.15	1%	0.1166
	2%	0.2331
333.15	1%	0.1166
	2%	0.2331

B.11 Hasil Perhitungan Bilangan Hatta (Ha) dan *Enhancement Factor* (Ei)

Tabel B.11 Hasil perhitungan bilangan Hatta (Ha) dan *enhancement factor* (Ei) pada temperatur 303.15 - 333.15 K dengan konsentrasi MDEA 40% berat dengan promotor *piperazine* (1% & 2% berat)

Temperatur (K)	Ha		$\frac{1}{2}Ei$	
	<i>Piperazine</i> (1% berat)	<i>Piperazine</i> (2% berat)	<i>Piperazine</i> (1% berat)	<i>Piperazine</i> (2% berat)
303.15	8.2227	14.4864	67.2928	68.6607
308.15	8.0959	17.2687	70.1850	72.2809
313.15	10.7862	17.0632	74.0249	75.4500
318.15	13.5450	19.9686	78.1976	79.6416
323.15	16.4016	23.0002	82.7027	84.1871
328.15	19.3819	26.1857	87.5430	89.0836
333.15	22.5247	32.9079	92.7645	95.4480

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Donsius, penulis dilahirkan di Bekasi yang terletak di Propinsi Jawa Barat, pada tanggal 26 Maret 1993, merupakan anak kedua dari empat bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuhnya yaitu dimulai di SD Setia Bekasi, SMPN 11 Bekasi, dan SMAN 2 Tambun Selatan. Pada jenjang perkuliahan penulis melanjutkan studi Diploma di Universitas Sebelas Maret kemudian melanjutkan jenjang Strata-1 di Institut Teknologi

Sepuluh Nopember jurusan Teknik Kimia. Untuk riset tugas akhir penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa bersama partnernya Akmal Fuadi, yang dibimbing oleh Fadlilatul Taufany, ST, Ph.D dan Siti Nurkhamidah, ST, MS, Ph.D, dan selanjutnya melakukan penelitian dengan judul ” Studi Absorpsi CO₂ dalam Larutan MDEA-TEA dengan Katalis PZ”. Penulis juga pernah melakukan kerja praktek di PT Semen Indonesia. Untuk korespondensi dapat menghubungi email penulis donsiusmarbun@gmail.com.

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Akmal Fuadi adalah anak dari 3 bersaudara. Lahir di kota Semarang, 7 Februari 1993. Penulis menjalani dunia pendidikan formal di SD Anjasgoro 01 Semarang tahun 1999-2005, SMP Negeri 1 Semarang tahun 2005-2008, SMA Negeri 6 Semarang tahun 2008-2011, Jenjang Diploma III (D-III)

Jurusan Teknik Kimia Universitas Diponegoro Semarang tahun 2011-2014, dan melanjutkan ke jenjang Strata I (S-1) Departemen Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya tahun 2015-2017. Untuk riset tugas akhir, penulis memilih laboratorium Perpindahan Panas dan Massa bersama partnernya Donsius, yang dibimbing oleh Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D dan Siti Nurkhamidah dengan judul ‘Studi Absorpsi CO₂ dalam Larutan MDEA-TEA dengan Katalis PZ’. Penulis juga melakukan kerja praktek di PT. Petrokimia Gresik Plan III-B pada tahun 2015 dengan tugas khusus Analisa efisiensi alat di Unit Reaksi Asam Fosfat. Penulis dapat dihubungi melalui email akmalfuadi8@gmail.com